



TUGAS AKHIR - EE 184801

**EFEK PARTIKEL LOGAM MELAYANG TERHADAP
KARAKTERISTIK BREAKDOWN PADA ISOLASI MINYAK**

Muhammad Novis Ibrahim
NRP 07111540000134

Dosen Pembimbing
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.
Daniar Fahmi, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



FINAL PROJECT - EE 184801

**EFFECT OF FLOATING CONDUCTIVE PARTICLE ON
BREAKDOWN CHARACTERISTICS IN OIL INSULATION**

Muhammad Novis Ibrahim
NRP 07111540000134

Advisor
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.
Danar Fahmi, S.T., M.T.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan tugas akhir saya dengan judul **"Efek Partikel Logam Melayang Terhadap Karakteristik Breakdown Pada Isolasi Minyak"** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 9 Januari 2019



Muhammad Novis Ibrahim

NRP. 07111540000134

**EFEK PARTIKEL LOGAM MELAYANG
TERHADAP KARAKTERISTIK BREAKDOWN
PADA ISOLASI MINYAK**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagai Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
NIP. 19700712 199802 1001

Daniar Fahmi, ST. MT.
NIP. 19890925 201404 1002

SURABAYA
Januari 2019

EFEK PARTIKEL LOGAM MELAYANG TERHADAP KARAKTERISTIK BREAKDOWN PADA ISOLASI MINYAK

Nama : Muhammad Novis Ibrahim
NRP : 07111540000134
Pembimbing I : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Pembimbing II : Daniar Fahmi, ST., MT.

ABSTRAK

Kontaminan didalam isolasi minyak dapat melayang ketika memenuhi beberapa kondisi. Keberadaan kontaminan dapat mempengaruhi karakteristik elektris dari isolasi minyak. Tujuan pengujian ini untuk mengetahui karakteristik *breakdown* akibat adanya pengaruh partikel logam melayang di dalam isolasi minyak. Pada pengujian ini menggunakan pembangkitan tegangan tinggi DC laboratorium, menggunakan resistor 56 Ω yang disambung dengan oscilloscope untuk mendeteksi arus korona, menggunakan kamera digunakan untuk mengambil gambar cahaya korona serta aplikasi CST Studio untuk mensimulasikan medan listrik yang ada diantara elektroda dan partikel. Variable yang digunakan berupa ukuran dan bentuk partikel serta jarak antara partikel dengan elektroda *ground*.

Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa nilai rata - rata tegangan *inception* dan *breakdown* berbanding terbalik dengan ukuran partikel kontaminan. Nilai puncak arus korona berbanding lurus dengan ukuran partikel kontaminan. Tegangan *breakdown* terendah terjadi saat partikel berada dekat dengan elektroda tetapi tidak menyentuh.

Kata kunci: *Breakdown, Inception, Partikel Melayang, Isolasi Minyak.*

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

EFFECT OF FLOATING CONDUCTIVE PARTICLE ON BREAKDOWN CHARACTERISTICS IN OIL INSULATION

Name : Muhammad Novis Ibrahim
NRP : 07111540000134
Advisor I : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Advisor II : Daniar Fahmi, ST., MT.

ABSTRACT

The contaminant particle can float in oil insulation when this component met certain conditions. The presence of contaminants can affect the electrical characteristics of oil insulation. This experiment to determine the breakdown characteristics in oil insulation cause of presence floating conductive particle. This experiment used generation of DC high voltage laboratory, used a 56 Ω is also connected with an oscilloscope to detect corona current, the camera is used to take corona's light and the CST Studio to simulate the electric field between particle and electrodes. Variables used are particle size and shape and the distance between particles and ground electrode.

Results show that the average value of the inception and breakdown voltage is inversely propotional to the particle size of contaminant. The peak value of the corona current is directly propotional to the particle size of contaminant. The lowest breakdown voltage occurs when the particle close to the electrode but not contacted.

Keywords: Breakdown, Inception, Floating Particle, Oil Insulation

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan petunjuk-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “EFEK PARTIKEL LOGAM MELAYANG TERHADAP KARAKTERISTIK BREAKDOWN PADA ISOLASI MINYAK”. Tujuan penulisan tugas akhir ini yaitu untuk memenuhi salah satu syarat kelulusan pada jenjang pendidikan S1 Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Selama melakukan penelitian ini, penulis banyak mendapatkan bimbingan, dukungan, kritik dan saran dari berbagai pihak, sehingga dapat memotivasi penulis untuk menyelesaikan penelitian ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat, hidayah serta selalu memberikan penulis kesehatan, keselamatan dan kelancaran selama menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Kepada kedua orang tua, kakak serta adik penulis yang selalu memberi kasih sayang, dukungan dan memotivasi penulis agar bersemangat dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Kepada Dosen Pembimbing, Bapak I Made Yulistya Negara dan Bapak Daniar Fahmi yang selalu membimbing dan memberi pengarahan kepada penulis agar dapat menyelesaikan tugas akhir dengan baik.
4. Kepada Dosen Wali, Bapak Heri Suryoatmojo yang selalu membantu prihal akademik serta selalu memotivasi penulis.
5. Kepada Vinda Dwi Damayanti, yang selalu memberi motivasi dan semangat kepada penulis untuk menyelesaikan pengujian untuk tugas akhir di penghujung kuliah.
6. Kepada teman – teman Pemandu NextGen 3.0 yang selalu membawa keceriaan ditengah – tengah kejenuhan kuliah terutama tugas akhir ini.
7. Kepada teman – teman ITSSMANSASI’15 yang selalu sedia menjadi tempat pelarian penulis disaat lelah dengan dinamika perkuliahan.
8. Kepada teman – teman e55 yang setia menemani dinamika perkuliahan dari awal masa mahasiswa baru.
9. Kepada teman – teman asisten Laboratorium Tegangan Tinggi yang sudah banyak membantu dalam pengerjaan tugas akhir.

Penulis menyadari bahwa penelitian ini masih belum sempurna, tetapi penulis akan selalu belajar untuk menutupi ke-tidak sempurna itu, dan penulis berharap, kekurangan dalam penelitian ini dapat dijadikan bahan pembelajaran di kemudian hari. Dengan segenap hati, penulis mengucapkan Terimakasih.

Surabaya, 9 Januari 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK.....	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Metodologi	2
1.3 Sistematika penulisan.....	3
BAB 2 DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Isolasi cair.....	5
2.1.1 Karakteristik isolasi cair	5
2.1.2 Karakteristik fisik isolasi cair.....	5
2.1.3 Karakteristik kimia isolasi cair	6
2.1.4 Jenis – jenis isolasi cair.....	7
2.2 Kekuatan dielektrik	8
2.3 Mekanisme kegagalan isolasi cair	9
2.3.1 Teori kegagalan elektronik	9
2.3.2 Teori kegagalan akibat partikel pejal.....	9
2.3.3 Teori volume minyak tertekan	9
2.3.4 Pengaruh temperatur, kandungan gas, dan air	9
2.4 Partikel kontaminan	10
2.5 Fenomena korona.....	11
2.6 Tinjauan pustaka	12
BAB 3 SIMULASI DAN PENGUJIAN.....	13
3.1 Peralatan pengujian	13
3.1.1 Pembangkitan tegangan tinggi DC	14
3.1.2 Elektroda uji	16
3.1.3 Partikel kontaminan	16
3.1.4 Isolasi minyak	17
3.1.5 Resistor dan surge arrester	17
3.1.6 Oscilloscope	18
3.1.7 DMI 551 & OT 276.....	19

3.2 Pelaksanaan pengujian.....	19
3.3 Pelaksanaan simulasi	22
BAB 4 HASIL DAN ANALISIS.....	25
4.1 Breakdown voltage tanpa kontaminan	25
4.2 Inception dan breakdown voltage	25
4.3 Arus korona.....	33
4.3.1 Partikel kontaminan 5mm	33
4.3.2 Partikel kontaminan 8mm	37
4.3.3 Partikel kontaminan 10mm.....	40
4.4 Fenomena korona dan simulasi	47
BAB 5 PENUTUP.....	57
5.1 Kesimpulan	57
5.2 Saran	58
DAFTAR PUSTAKA	xiii
RIWAYAT HIDUP PENULIS	xv

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Medan listrik	8
Gambar 3. 1	Skema rangkaian pengujian karakteristik breakdown	13
Gambar 3. 2	Rangkaian pengujian karakteristik breakdown	14
Gambar 3. 3	Rangkaian pembangkitan DC.....	15
Gambar 3. 4	Elektroda uji	16
Gambar 3. 5	(a) Desain kontaminan, (b) kontaminan pengujian.....	16
Gambar 3. 6	Isolasi minyak.....	17
Gambar 3. 7	Resistor dan surge arrester	18
Gambar 3. 8	Oscilloscope GWInstek.....	18
Gambar 3. 9	Digital measuring instrument 551 & OT 276	19
Gambar 3. 10	Skema elektroda	20
Gambar 3. 11	Flowchart pelaksanaan pengujian.....	21
Gambar 3. 12	Tampilan simulasi.....	22
Gambar 3. 13	Flowchat pelaksanaan simulasi	23
Gambar 4. 1	Grafik inception dan breakdown voltage partikel ukuran 5mm.....	27
Gambar 4. 2	Grafik inception dan breakdown voltage partikel ukuran 8mm.....	29
Gambar 4. 3	Grafik inception dan brekdown voltage partikel ukuran 10mm.....	31
Gambar 4. 4	Mekanisme pelepasan korona pada partikel melayang, (a) partikel dekat dengan elektroda negatif, (b) partikel berada pada pusat celah.....	32
Gambar 4. 5	Arus korona saat inception pada partikel 5mm dengan jarak (a) 0mm, (b) 2mm, (c) 4mm, (d)6mm, (e) 7.5mm, (f) 9mm, (g) 11mm (h) 13mm (i) 15mm.	36
Gambar 4. 6	Arus korona saat inception pada partikel 8mm dengan jarak (a) 0mm, (b) 2mm, (c) 4mm, (d) 6mm, (e) 8mm, (f) 10mm, (g) 12mm.	39
Gambar 4. 7	Arus korona saat inception pada partikel 10mm dengan jarak (a) 0mm, (b) 2mm, (c) 4mm, (d) 5mm, (e) 6mm, (f) 8mm, (g) 10mm.	42

Gambar 4. 8	Arus inception (a) partikel 5mm, (b) partikel 8mm, (c) partikel 10mm dengan $d = 2\text{mm}$ saat diperbesar.....	44
Gambar 4. 9	Perkembangan arus korona (a) partikel 8mm $d=2\text{mm}$ 52.36kV, (b) partikel 8mm $d=2\text{mm}$ 60kV, (c) partikel 10mm $d=2\text{mm}$ 47.86kV, (d) partikel 10mm $d=2\text{mm}$ 55kV.....	46
Gambar 4. 10	Korona pada partikel 8mm (simetris) jarak 2mm 64.2kv, (a) korona pada bagian bawah partikel, (b) korona pada bagian atas partikel, (c) hasil simulasi.....	47
Gambar 4. 11	Korona pada partikel 8mm (simetris) jarak 6mm 75.6kv, (a) korona pada bagian atas partikel, (b) korona pada bagian bawah partikel, (c) hasil simulasi.....	49
Gambar 4. 12	Korona pada partikel 8mm (simetris) jarak 10mm 65kv, (a) korona pada bagian atas partikel, (b) korona pada bagian bawah partikel, (c) hasil simulasi	50
Gambar 4. 13	Korona pada partikel 10mm (unsimetris) jarak 2mm 59,4kv, (a) korona pada bagian atas partikel, (b) korona pada bagian bawah partikel, (c) hasil simulasi	52
Gambar 4. 14	Korona pada partikel 10mm (unsimetris) jarak 5mm 71kv, (a) korona pada bagian atas partikel, (b) korona pada bagian bawah partikel, (c) hasil simulasi.....	53
Gambar 4. 15	Korona pada partikel 10mm (unsimetris) jarak 8mm 60.3kv (a) korona pada bagian atas partikel, (b) korona pada bagian bawah partikel, (c) hasil simulasi	55

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Karakteristik elektris bahan	10
Tabel 3. 1	Spesifikasi peralatan pembangkitan tegangan tinggi	15
Tabel 4. 1	Breakdown voltage minyak tanpa kontaminan	25
Tabel 4. 2	Inception voltage partikel ukuran 5mm	25
Tabel 4. 3	Breakdown voltage partikel ukuran 5mm	26
Tabel 4. 4	Nilai rata - rata inception dan breakdown voltage partikel 5mm	26
Tabel 4. 5	Inception voltage partikel ukuran 8mm	27
Tabel 4. 6	Breakdown voltage partikel ukuran 8mm	28
Tabel 4. 7	Nilai rata - rata inception dan breakdown voltage partikel 8mm	28
Tabel 4. 8	Inception voltage partikel ukuran 10mm	29
Tabel 4. 9	Breakdown voltage partikel ukuran 10mm	30
Tabel 4. 10	Nilai rata - rata inception dan breakdown voltage partikel 10mm	30
Tabel 4. 11	Nilai rata - rata inception dan breakdown voltage tiap partikel	32
Tabel 4. 12	Nilai puncak arus korona saat inception partikel 5mm	36
Tabel 4. 13	Nilai puncak arus korona saat inception partikel 8mm	39
Tabel 4. 14	Nilai puncak arus korona inception partikel 10mm	42
Tabel 4. 15	Nilai rata - rata puncak arus korona saat inception tiap partikel	43

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Isolasi berfungsi sebagai pemisah antara bagian bertegangan dengan tidak bertegangan maupun memisahkan dua atau lebih konduktor berbeda tegangan. Isolasi cair merupakan salah satu dari jenis isolasi. Isolasi cair digunakan pada peralatan listrik yang memiliki rongga dan dapat menjadi pendingin peralatan untuk mengurangi rugi – rugi panas.

Isolasi juga dapat mengalami kegagalan (*breakdown*) tidak terkecuali isolasi cair. Menurunnya kekuatan dielektrik dari isolasi cair merupakan penyebab umum kegagalan pada isolasi cair. Penurunan kekuatan dielektrik dari isolasi cair dapat disebabkan faktor penuaan / umur dari peralatan listrik dan isolasi, seperti pada transformator yang menggunakan isolasi cair berupa minyak. Saat mengalami penuaan komponen didalam transformator mengalami penurunan kualitas dan menyebabkan munculnya kontaminasi terhadap isolasi minyak[1].

Kontaminasi pada isolasi minyak dapat berupa gelembung gas, kandungan air hingga partikel pejal. kandungan air dalam isolasi minyak dapat berasal dari penurunan kualitas dari isolasi kertas yang biasa digunakan pada transformator, gelembung gas dapat berasal dari suhu minyak yang berada diatas suhu kerja dalam waktu yang lama. Partikel pejal dapat berasal dari penurunan kualitas bagian dalam transformer seperti belitan, inti besi, badan trafo atau partikel pejal dapat masuk kedalam bagian peralatan pada saat pemasangan atau pemeliharaan peralatan[2].

Partikel pejal atau kontaminan ini dapat bergerak / melayang di dalam isolasi minyak akibat terinduksi muatan. Partikel kontaminan yang terinduksi muatan akan bergerak melayang diantara bagian bertegangan dan tidak bertegangan (*floating particle*), proses ini dapat disebut *partial discharge*. *Floating particle* akan tetap melayang sampai terjadi kegagalan isolasi[3].

Partikel kontaminan yang melayang pada isolasi minyak memiliki pengaruh terhadap nilai kegagalan isolasi, berdasarkan permasalahan tersebut maka pada penelitian ini akan dilakukan mencari fenomena yang terjadi saat *pre-breakdown*, mencari nilai arus korona dan tegangan saat *inception*, mengetahui korona yang terjadi pada isolasi minyak tersebut dan mencari nilai tegangan pada saat terjadi *breakdown* yang dipengaruhi

oleh adanya kontaminan logam melayang di dalam isolasi minyak. Selanjutnya mencari hubungan antara perbedaan letak posisi, ukuran dan bentuk dari kontaminan logam melayang terhadap karakteristik breakdown pada isolasi minyak.

Batasan masalah pada penelitian ini adalah isolasi cair yang digunakan adalah minyak mineral Shell Diala B, partikel kontaminan yang digunakan berbahan dasar *stainless steel* dengan dua bentuk yaitu bentuk simetris (*ellipse*) dan unsimetris (diujung sisi kerucut dan ujung lainnya silinder), elektroda pengujian yang digunakan berbentuk datar dan jenis tegangan yang digunakan untuk pengujian adalah tegangan DC.

Tujuan dari penelitian adalah untuk mengetahui pengaruh adanya kontaminan logam melayang terhadap karakteristik *pre-breakdown* dan *breakdown* dengan ukuran dan bentuk kontaminan yang berbeda. Selain itu, tugas akhir ini diharapkan dapat bermanfaat untuk menjadi referensi penelitian atau tugas akhir selanjutnya dan menjadi salah satu media belajar dalam mempelajari *breakdown* pada isolasi minyak.

1.2 Metodologi

1. Studi Literatur

Tahap pertama adalah mencari informasi, data dan referensi yang berkaitan dengan topik tugas akhir ini. DC breakdown, floating particle, oil insulation dan corona characteristics merupakan beberapa contoh kata kunci yang telah digunakan.

2. Persiapan pengujian

Tahap selanjutnya adalah melakukan desain dan pembuatan kelengkapan alat yang dipakai dalam proses pengujian.

3. Pengujian dan Pengambilan Data

Setelah kelengkapan pengujian telah siap akan dilakukan pengujian dan pengambilan data di laboratorium tegangan tinggi.

4. Simulasi

Simulasi dilakukan menggunakan aplikasi CST Studio Suite untuk mengetahui medan yang terjadi antara elektroda dengan partikel kontaminan melayang pada isolasi minyak.

5. Analisis dan penarikan kesimpulan

Tahap selanjutnya adalah melakukan analisis data hasil pengujian, data hasil simulasi dan hasil simulasi lalu akan dilakukan penyimpulan dari hasil tersebut.

6. Pembuatan Laporan

Keseluruhan tahap, hasil serta kesimpulan yang didapat akan disusun menjadi buku Tugas Akhir.

1.3 Sistematika penulisan

Bab pertama berisi latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat, metodologi, sistematika penulisan dari penulisan pada studi ini.

Bab kedua berisi teori - teori seputar *dc breakdown*, *corona*, *floating particle*, isolasi minyak, kontaminan, kegagalan isolasi cair.

Bab ketiga berisi tentang pengujian isolasi menggunakan pembangkitan tegangan tinggi dc, pengambilan data menggunakan Oscilloscope, metode pengolahan data menggunakan MATLAB serta simulasi menggunakan CST Studio suite yang akan digunakan pada tugas akhir ini.

Bab keempat berisi hasil percobaan yang telah dilakukan serta hasil analisi yang telah dilakukan terhadap hasil percobaan sehingga dapat diketahui karakteristik *breakdown* pada isolasi minyak.

Bab kelima berisi kesimpulan dari hasil analisa dan saran dari studi yang telah dilakukan.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB 2

DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Isolasi cair

2.1.1 Karakteristik isolasi cair

Isolasi cair sering digunakan untuk mengisi rongga dari peralatan listrik yang berfungsi sebagai pemisah bagian – bagian bertegangan seperti pada kabel dan transformator, sebagai pendingin seperti pada transformator untuk mengurangi rugi-rugi yang disebabkan oleh panas, pemadam busur api seperti pada pemutus tenaga/*circuit breaker*, sebagai dielektrikum yang nilai dielektriknya tinggi seperti pada kapasitor[1].

Sifat-sifat listrik memiliki peran penting dalam menentukan kinerja dari isolasi cair, seperti:

- a. Permittivitas relatif, yaitu sifat kapasitansi isolasi minyak tiap satuan volume. Permittivitas minyak petroleum berkisar dari 2,0 hingga 2,6 berbeda dengan minyak askarel yang berkisar 4,5 hingga 5 dan minyak silikon yang berkisar 2,0 hingga 73.
- b. Resistivitas, yaitu sifat resistansi isolasi minyak tiap satuan meter. Isolasi cair dapat dikatakan baik apabila memiliki nilai $10^{16} \Omega/m$.
- c. Faktor daya, kinerja dari isolasi cair dapat ditentukan pada tegangan ac dengan factor daya. Factor daya dapat menunjukan rugi dielektrik yang disebabkan oleh isolasi cair. Tidak seperti pada kabel, rugi dielektrik yang disebabkan isolasi cair pada trafo dapat diabaikan karena nilainya kecil dibanding rugi tembaga dan inti besi. Pada trafo berminyak murni dan trafo kering memiliki factor daya yang bervariasi mulai 10^{-4} pada 20° hingga 10^{-3} pada 90° di frekuensi 50Hz.
- d. Kemampuan isolasi cair menahan tekanan listrik tinggi[4].

2.1.2 Karakteristik fisik isolasi cair [5]

Berikut beberapa karakteristik fisik isolasi cair yang dapat diamati untuk mengetahui kualitas dari isolasi tersebut.

- a. Kejernihan fluida
Isolasi cair yang baik memiliki beberapa tanda seperti jernih, bersih, bebas endapan. Endapan yang berada didalam isolasi cair akan dilarutkan oleh isolasi tersebut tetapi apabila sudah

banyak zat yang terlarut pada isolasi cair maka isolasi tersebut akan berubah menjadi keruh akibat banyaknya endapan.

- b. Massa jenis
massa jenis adalah nilai perbandingan dari massa cairan dengan volume tersebut, menurut SPLN 49 – 91 : 1982, massa jenis isolasi cair tidak boleh melebihi 0.859 gr/cm^3 [6].
- c. Viskositas
Kekentalan atau viskositas pada isolasi cair harus rendah, ini bertujuan supaya isolasi cair tidak mudah terkontaminasi dan isolasi cair mudah dalam bersirkulasi untuk pendinginan.
- d. Titik tuang
batas dari isolasi cair dapat mengalir pada temperatur rendah itu yang dimaksud titik tuang, isolasi cair yang bagus apabila memiliki nilai titik tuang yang rendah.
- e. Titik nyala
batas isolasi cair terhadap pemanasan, isolasi cair yang baik apabila tinggi nilai titik nyalanya.

2.1.3 Karakteristik kimia isolasi cair

Berikut beberapa karakteristik kimia isolasi cair, yaitu :

- a. Stabilitas oksidasi
kekuatan isolasi cair dalam mempertahankan dari proses oksidasi. Proses oksidasi pada isolasi cair akan menyebabkan kerusakan seperti korosi pada peralatan listrik dan menambang viskositas sehingga sulit untuk bersirkulasi menyebabkan kenaikan thermal.
- b. derajat keasaman (pH)
derajat keasaman adalah indikator tingkat keasaman atau kebasaan. Derajat keasaman umumnya digunakan untuk menentukan pergantian atau purifikasi pada isolasi cair.
- c. Kandungan air
kandungan air sangat berpengaruh terhadap tegangan tembus. Kadar air yang banyak pada isolasi cair akan mempercepat proses kegagalan dengan cara menurunkan kekuatan dielektrik isolasi cair tersebut.

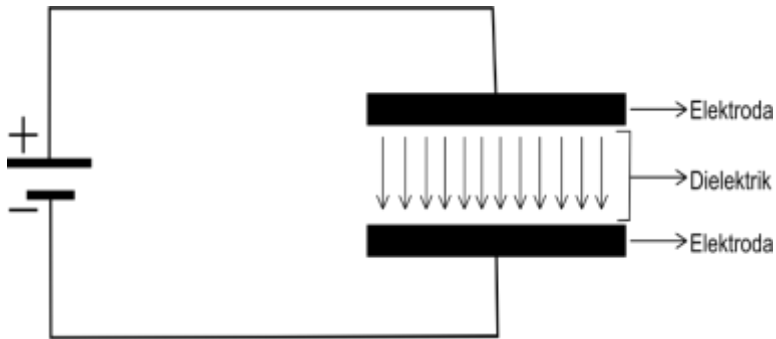
2.1.4 Jenis – jenis isolasi cair

Berikut merupakan beberapa jenis dari isolasi cair, yaitu:

- a. Minyak isolasi Nabati
Minyak isolasi nabati berasal dari tumbuhan, pada akhir abad-19 mulai banyak penelitian terkait minyak jenis ini didasari oleh makin menipisnya persediaan minyak bumi. Minyak jagung, minyak kelapa murni, minyak kedelai dan minyak jarak menjadi bahan penelitian sampai saat ini[7].
- b. Minyak Isolasi Mineral
Isolasi cair berjenis mineral merupakan gabungan dari bermacam – macam hidrokarbon yang berasal dari minyak alam serta melalui proses destilasi dan proses rafinasi. Komponen utama dari minyak ini adalah parafinne, naphthene, aromate dan olefin. Sifat elektrik minyak mineral akan memburuk apabila meningkatnya kandungan air didalamnya. Selama penggunaan minyak mineral didalam peralatan listrik, minyak akan mengalami penuaan akibat kelembaban, temperatur, oksigen dan katalisator (tembaga/ bahan metal).
- c. Isolasi Cair Sintesis
 1. Hidrokarbon Murni
Polyisobuten adalah salah satu jenis hidrokarbon murni yang didapat dari hasil polimerisasi buten dari rantai polyolefin. Isolasi ini sering digunakan untuk mengisi rongga pada kapasitor.
 2. Askarel
Polychlorinated Biphenyl (PCB) atau yang dikenal dengan askarel, isolasi ini tidak mudah terbakar, penggunaan askarel sudah dilarang di seluruh dunia karena sifatnya yang sulit terurai dan tidak ramah lingkungan.
 3. Cairan Silikon
Isolasi jenis ini digunakan sebagai pengganti askarel yang tidak ramah lingkungan tetapi cairan silicon ini tidak dapat mencapai daya tahan terhadap api setinggi askarel[1].

2.2 Kekuatan dielektrik

Sepasang elektroda seperti pada Gambar 2.1, elektroda tersebut mengapit bahan dielektrik lalu kedua elektroda dihubungkan dengan sumber listrik maka akan timbul medan listrik(E). Elektron – elektron akan terlepas dari ikatannya akibat medan listrik tersebut. Elektron – elektron bebas tersebut akan bersifat konduktor didalam dielektrik. Tiap bahan dielektrik mempunyai kemampuan yang berbeda – beda untuk menahan sifat konduktor yang ditimbulkan dari elektron bebas, kemampuan ini disebut kekuatan dielektrik. Saat bahan dielektrik sudah tidak dapat menahan beban tersebut akan terjadi tembus atau *breakdown*.



Gambar 2. 1 Medan listrik

$$E = \frac{V}{d} \quad (2.1)$$

E : Kuat medan listrik yang dapat ditahan oleh dielektrik (kV/cm)

V : Tegangan maksimum yang dapat dibaca alat ukur (kV)

D : Tebal isolasi/jarak elektroda (cm)

Kuat medan listrik yang dapat ditahan oleh dielektrik atau yang bisa disebut juga kekuatan dielektrik dapat diartikan sebagai perbandingan tegangan kegagalan (V) dan tebal isolasi (d) yang memisahkan antara elektroda.

2.3 Mekanisme kegagalan isolasi cair

Banyak hal yang mempengaruhi kegagalan pada isolasi cair, kandungan gas dan air serta kontaminasi yang terdapat pada isolasi cair akan mempercepat terjadinya kegagalan.

2.3.1 Teori kegagalan elektronik

Teori ini menganggap mekanisme kegagalan yang serupa dengan isolasi gas, bahwa elektron berasal dari emisi medan yang terjadi di katoda. Elektron dianggap memperoleh energi dari medan listrik lalu akan menumbuk molekul – molekul disekitarnya proses ini disebut ionisasi, akibat ionisasi ini akan menyebabkan banjir elektron (avalanche). Adanya elektron yang bergerak menuju anoda dan ion positif yang bergerak menuju katoda menyebabkan timbulnya arus konduksi serta memicu kegagalan (*breakdown*)[4].

2.3.2 Teori kegagalan akibat partikel pejal

Adanya partikel diantara elektroda dapat menyebabkan peningkatan medan lokal disekitar partikel tergantung dari bentuk partikel tersebut. Jika medan ini sangat tinggi akan mengakibatkan kegagalan lokal didekat partikel dan dapat memicu pembentukan gelembung gas. Kekuatan dielektrik dari gas lebih rendah dibanding kekuatan dielektrik isolasi minyak, maka akan terjadi penurunan kekuatan dielektrik disekitar partikel dan gelembung gas tersebut yang akan memicu terjadinya kegagalan (*breakdown*)[4].

2.3.3 Teori volume minyak tertekan

Kontaminasi serta ketidakmurnian menentukan kuat gagal dari isolasi cair, kuat gagal isolasi cair ditentukan oleh daerah terlemah dari isolasi tersebut. Kuat gagal berbanding terbalik dengan volume minyak tertekan kandungan gas, kekentalan dan keberadaan kontaminasi mempengaruhi tegangan gagal karena terdistribusi tidak merata sehingga menyebabkan penurunan tegangan gagal[1].

2.3.4 Pengaruh temperatur, kandungan gas, dan air

Pengaruh temperatur dan kandungan air ditentukan dari kelembaban relatif isolasi cair tersebut. Pada kebanyakan artikel menjelaskan bahwa kuat gagal isolasi dipengaruhi oleh temperatur adalah pernyataan yang tidak tepat karena temperatur hanya mempengaruhi isolasi cair/minyak yang memiliki kandungan air tertentu. Begitu pula

dengan gelembung gas pada isolasi cair, jumlah gas yang terlarut tidak mempengaruhi kuat gagal isolasi melainkan jenis dari gas tersebut yang mempengaruhi kuat gagal isolasi cair[1].

2.4 Partikel kontaminan

Partikel kontaminan berbentuk benda pejal dapat masuk kedalam peralatan listrik atau berada didalam peralatan listrik berasal dari penurunan kualitas bagian dalam transformer seperti belitan, inti besi, badan trafo atau partikel pejal dapat masuk kedalam bagian peralatan pada saat pemasangan atau pemeliharaan peralatan[2].

Partikel pejal yang berasal dari penurunan kualitas peralatan listrik umumnya bersifat konduktif atau logam. Komponen didalam peralatan listrik terdiri dari bermacam – macam jenis logam seperti besi, tembaga ataupun aluminium. Berikut merupakan karakteristik elektris dari beberapa bahan.

Tabel 2. 1 Karakteristik elektris bahan [8]

Bahan logam	ρ ($\Omega \cdot m$) at 20 °C	σ (S/m) at 20 °C
	Resistansi	Konduktivitas
Silver	1.59×10^{-8}	6.30×10^7
Copper	1.68×10^{-8}	5.96×10^7
Annealed copper	1.72×10^{-8}	5.80×10^7
Gold	2.44×10^{-8}	4.10×10^7
Aluminum	2.82×10^{-8}	3.5×10^7
Calcium	3.36×10^{-8}	2.98×10^7
Tungsten	5.60×10^{-8}	1.79×10^7
Zinc	5.90×10^{-8}	1.69×10^7
Nickel	6.99×10^{-8}	1.43×10^7
Lithium	9.28×10^{-8}	1.08×10^7
Iron	1.0×10^{-7}	1.00×10^7
Platinum	1.06×10^{-7}	9.43×10^6
Tin	1.09×10^{-7}	9.17×10^6
Carbon steel	(1010)	1.43×10^{-7}
Lead	2.2×10^{-7}	4.55×10^6
Titanium	4.20×10^{-7}	2.38×10^6
Grain oriented electrical steel	4.60×10^{-7}	2.17×10^6
Manganin	4.82×10^{-7}	2.07×10^6
Constantan	4.9×10^{-7}	2.04×10^6
Stainless steel	6.9×10^{-7}	1.45×10^6

Tabel 2. 1 Karakteristik elektris bahan [8] (lanjutan)

Bahan logam	ρ ($\Omega \cdot m$) at 20 °C	σ (S/m) at 20 °C
	Resistansi	Konduktivitas
Mercury	9.8×10^{-7}	1.02×10^6
Nichrome	1.10×10^{-6}	9.09×10^5
GaAs	5×10^{-7} to 10×10^{-3}	5×10^{-8} to 103
Carbon (amorphous)	5×10^{-4} to 8×10^{-4}	1.25 to 2×10^3
Carbon (diamond)	1×10^{12}	$\sim 10^{-13}$
Germanium	4.6×10^{-1}	2.17
Sea water	2×10^{-1}	4.8
Drinking water	2×10^1 to 2×10^3	5×10^{-4} to 5×10^{-2}
Silicon	6.40×10^2	1.56×10^{-3}
Wood (damp)	1×10^3 to 4	10^{-4} to 10^{-3}
Deionized water	1.8×10^5	5.5×10^{-6}
Glass	10×10^{10} to 10×10^{14}	10^{-11} to 10^{-15}
Hard rubber	1×10^{13}	10^{-14}
Wood (oven dry)	1×10^{14} to 16	10^{-16} to 10^{-14}
Sulfur	1×10^{15}	10^{-16}
Air	1.3×10^{16} to 3.3×10^{16}	3×10^{-15} to 8×10^{-15}
Paraffin wax	1×10^{17}	10^{-18}
Fused quartz	7.5×10^{17}	1.3×10^{-18}
PET	10×10^{20}	10^{-21}
Teflon	10×10^{22} to 10×10^{24}	10^{-25} to 10^{-23}

2.5 Fenomena korona

Korona adalah fenomena yang biasa terjadi pada tegangan tinggi. Korona sangat mudah diamati pada elektroda tidak seragam. Kerugian daya banyak terjadi akibat fenomena korona pada saluran tegangan tinggi dan sering menjadi penyebab kerusakan isolasi akibat proses kimia yang terbentuk dari peluahan, serta dapat mengganggu sistem komunikasi karena korona memiliki frekuensi tinggi. Pada tegangan Positif, korona akan muncul berwarna putih kebiruan. Namun, pada tegangan negatif, korona akan muncul titik bersinar[9].

2.6 Tinjauan pustaka

Berikut beberapa contoh hasil penelitian yang sudah dilakukan dan digunakan sebagai referensi dari tugas akhir ini, antara lain :

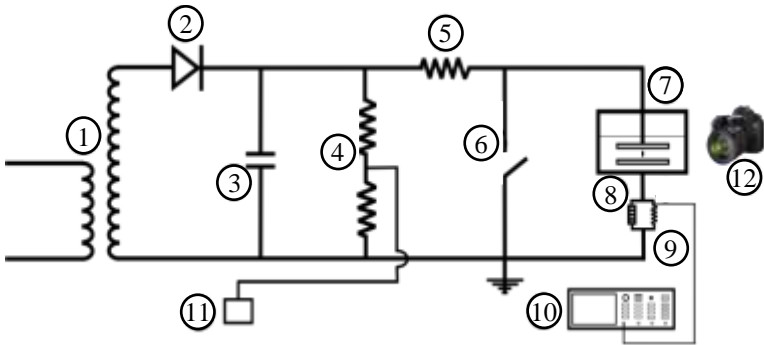
1. Pengaruh Bentuk dan Jumlah Partikel Terhadap Karakteristik *Partial Discharge* dan Tegangan Tembus Isolasi Minyak Pada Medan Seragam. Oleh Made Yudhi Setyawan pada tahun 2014. Penelitian tersebut dilakukan pada isolasi minyak serta menggunakan elektroda datar dengan berbagai macam dan jumlah dari partikel kontaminan, lalu menggunakan sumber DC. Penelitian tersebut memperoleh hasil bahwa semakin Panjang partikel, semakin banyak partikel maka akan semakin kecil nilai tegangan breakdown, namun karakter dari korona yang muncul sulit untuk ditentukan akibat pola grafik dan pengulangan arus yang tidak teratur[3].
2. *Particle-triggered Pre-breakdown Phenomena in Atmospheric Air Gap under ac Voltage*. Oleh Masanori Hara, Yulistya Negara, Makoto Setoguchi, Takashi Kurihara dan Junya Suehiro pada tahun 2005. Penelitian tersebut dilakukan pada isolasi udara dan menggunakan sumber AC diperoleh hasil bahwa terdapat korona trichel dan korona streamer pada sisi *floating particle* lalu mekanisme pelepasan korona dipengaruhi bentuk partikel, letak partikel dan tegangan yang dibangkitkan[10].
3. *Corona Discharge Mechanism and Breakdown Voltage Characteristics from Metallic Floating Particle in SF₆ Gas under dc Voltage*. Oleh Yulistya Negara, Kohei Yaji, Kiminobu Imasaka, Junya Suehiro, Noriyuki Hayashi' dan Masanori Hara pada tahun 2006. Penelitian tersebut dilakukan pada isolasi SF₆ dan menggunakan sumber DC diperoleh hasil bahwa sulit dibedakan antara pulsa korona positif dan korona negative karena pengulangan gelombang dan amplitudonya yang tidak teratur, serta adanya perkembangan aktif dari korona akibat adanya *floating particle* diantara dua elektroda[11].

BAB 3

SIMULASI DAN PENGUJIAN

3.1 Peralatan pengujian

Pada tugas akhir ini menggunakan tegangan tinggi DC dalam pengujian untuk mengetahui pengaruh adanya kontaminan logam melayang terhadap karakteristik *breakdown* pada isolasi minyak. Pada Gambar 3.1 merupakan skema dari rangkaian pengujian yang digunakan pada tugas akhir ini. terdapat beberapa peralatan yang digunakan seperti pembangkitan tegangan tinggi DC, kamera, objek penelitian, oscilloscope, resistor serta arrester dan pada Gambar 3.2 merupakan rangkaian yang digunakan selama pengujian.



Gambar 3. 1 Skema rangkaian pengujian karakteristik breakdown

Keterangan:

- | | |
|--------------------------|----------------------------------|
| 1. Trafo Tegangan Tinggi | 7. Objek Penelitian |
| 2. Dioda | 8. Arrester Tube |
| 3. Smoothing Capasitor | 9. Resistor 56Ω |
| 4. Resistor Pengukuran | 10. Oscilloscope |
| 5. Resistor Damping | 11. Digital Measuring Instrument |
| 6. Saklar Grounding | 12. Kamera Canon |

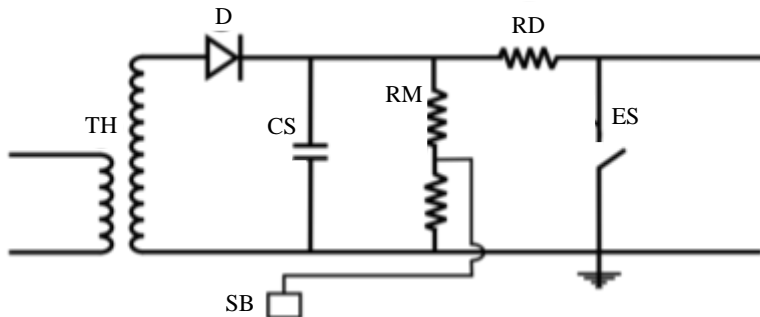


Gambar 3. 2 Rangkaian pengujian karakteristik breakdown

Pengujian ini menggunakan beberapa peralatan *hardware* maupun *software* untuk mendukung dalam mendapatkan dan mengolah data hasil pengujian seperti pembangkit tegangan tinggi DC, elektroda uji, kontaminan, minyak isolasi, oscilloscope dan MatLab.

3.1.1 Pembangkitan tegangan tinggi DC

Tegangan tinggi DC yang digunakan untuk pengujian ini dibangkitkan dari transformator tegangan tinggi AC di laboratorium tegangan tinggi elektro ITS yang diberi dioda sebagai pengubah menjadi tegangan tinggi DC.

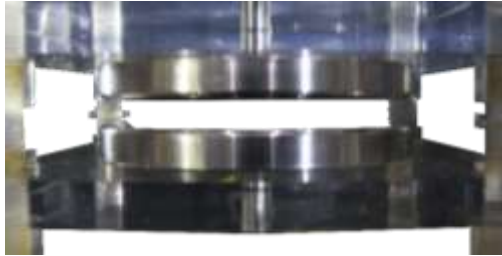


Gambar 3. 3 Rangkaian pembangkitan DC

Tabel 3. 1 Spesifikasi peralatan pembangkitan tegangan tinggi

Nama peralatan	Spesifikasi
<i>High Voltage Transformer</i>	100 kV , 10 kVA
<i>High Voltage Diode</i>	140 kV, 20mA
<i>Smoothing Capacitor</i>	140 kV, 25000pF
<i>Measuring Resistor</i>	140 kV DC, 280 MΩ
<i>Resistor Damping</i>	6 kΩ
Grounding Switch	-
<i>Control Box</i>	OT276 dan DMI551
<i>Secondary Part for RM (DC)</i>	75Ω

Tegangan suplai yang digunakan untuk transformator tegangan tinggi ini berasal dari PLN 220V yang memiliki perbandingan 220/100.000 V, tegangan output trafo merupakan tegangan AC yang disearahkan menggunakan diode tegangan tinggi, kemudian kapasitor berfungsi untuk mengurangi ripple supaya menghasilkan tegangan tinggi DC yang halus, tegangan tinggi DC yang halus akan diukur menggunakan resistor pengukuran yang selanjutnya diukur oleh *control box*, sebelum menuju objek yang ingin diuji, tegangan tinggi DC melewati resistor damping terlebih dahulu. Sebelum dan sesudah pengujian *grounding switch* akan pada posisi menutup untuk menyalurkan arus sisa pembangkitan ke tanah.



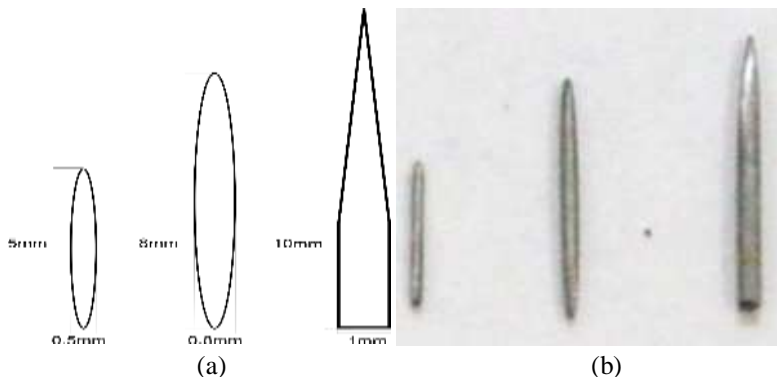
Gambar 3. 4 Elektroda uji

3.1.2 Elektroda uji

Pada gambar 3.4 merupakan gambar elektroda uji yang digunakan pada pengujian ini adalah dua elektroda datar, elektroda datar digunakan untuk mendapatkan pengujian dengan medan seragam. Elektroda ini berdiameter 17cm dan memiliki tebal 2cm serta berbahan dasar *stainless steel*.

3.1.3 Partikel kontaminan

Pada pengujian ini membutuhkan kontaminan, kontaminan tersebut berbahan *stainless steel* serta memiliki ukuran dan bentuk yang berbeda. Pada gambar 3.5 menjelaskan bahwa bentuk dari kontaminan simetris dengan Panjang 5mm dan 8mm sedangkan kontaminan unsimetris memiliki Panjang 10mm



Gambar 3. 5 (a) Desain kontaminan, (b) kontaminan pengujian



Gambar 3. 6 Isolasi minyak

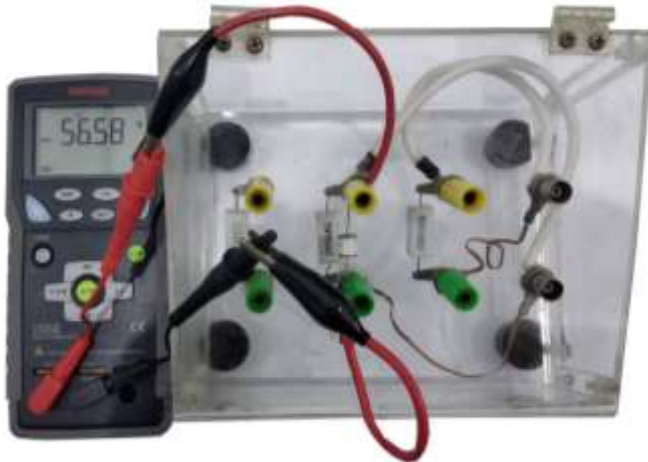
3.1.4 Isolasi minyak

Pada gambar 3.6 merupakan isolasi minyak yang digunakan pada pengujian ini adalah minyak mineral shell diala yaitu minyak yang sangat sering digunakan pada transformator khususnya di Indonesia. Untuk menampung minyak tersebut menggunakan kotak berbahan akrilik berukuran 41cm x 31cm x 36cm, sekitar 20 liter minyak isolasi digunakan supaya elektroda dan partikel melayang dapat terendam minyak.

3.1.5 Resistor dan surge arrester

Pada pengujian ini digunakan resistor surge arrester seperti yang terdapat pada gambar 3.7, resistor dengan nilai $56,6\Omega$ (56Ω) yang dipasang diantara elektroda dan grounding, pemasangan resistor ini bertujuan untuk mendapatkan bentuk dari arus korona pada isolasi minyak, arus korona akan melewati resistor kemudian timbul beda potensial dikedua ujung resistor dan selanjutnya dideteksi oleh oscilloscope.

Surge Arrester dengan seri Y08SV dipasang paralel dengan resistor, hal ini bertujuan untuk mengamankan oscilloscope dari tegangan tinggi sesaat apabila ada gangguan saat pengujian.



Gambar 3. 7 Resistor dan surge arrester

3.1.6 Oscilloscope

Pada gambar 3.8 adalah gambar dari oscilloscope yang digunakan untuk mendeteksi beda potensial pada resistor untuk mendapatkan nilai dan bentuk dari arus korona yang terjadi pada isolasi minyak. Oscilloscope GWInstek GDS-3254 ini mempunyai spesifikasi 250MHz.



Gambar 3. 8 Oscilloscope GWInstek



Gambar 3. 9 Digital measuring instrument 551 & OT 276

3.1.7 DMI 551 & OT 276

Pada Gambar 3.9 merupakan Digital measuring Instrument 551 dan Operating Terminal 276 yaitu alat pengukuran tegangan tinggi yang dibangkitkan sekaligus alat pengatur tegangan yang akan dibangkitkan pada trafo uji tegangan tinggi ini. DMI 551 ini digunakan untuk menampilkan tegangan yang terbangkit pada trafo yang akan digunakan untuk mengetahui nilai *inception voltage* dan nilai *breakdown voltage* pada pengujian ini.

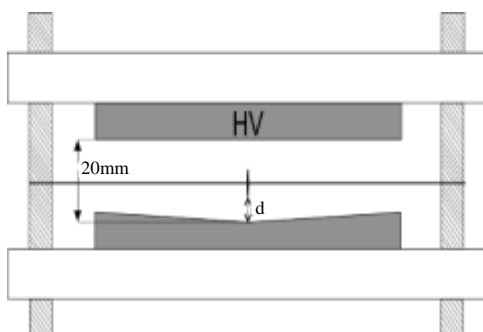
3.2 Pelaksanaan pengujian

Pengujian untuk tugas akhir ini yang dilakukan di laboratorium tegangan tinggi teknik elektro ITS. Pengujian ini akan menggunakan tegangan tinggi DC yang dihubungkan dengan objek pengujian berupa elektroda datar yang berada didalam minyak, diantara elektroda terdapat kontaminan berbahan *stainless steel*. Kontaminan ini memiliki perbedaan bentuk dan ukuran seperti bentuk simetris dengan ukuran 5mm, 8mm dan berbentuk unsimetris dengan ukuran 10mm.

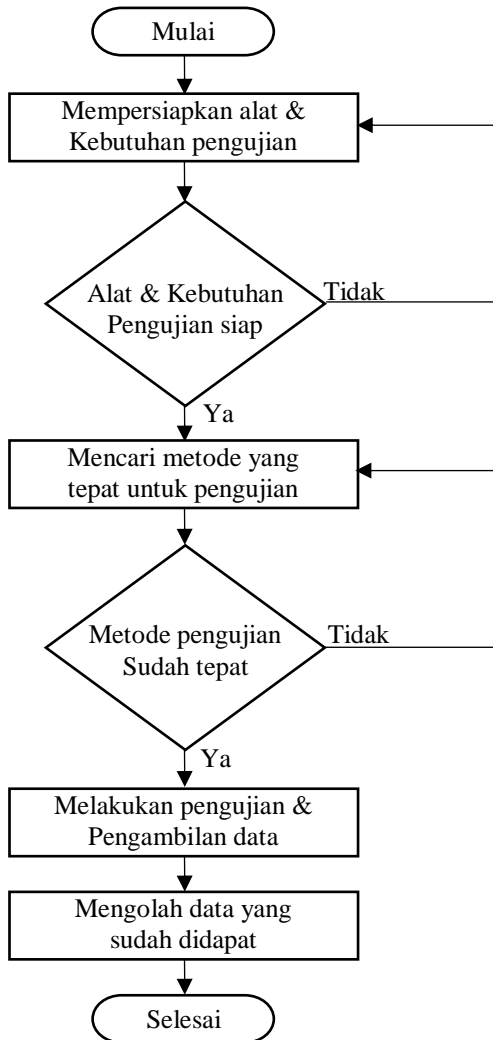
Langkah pertama persiapkan semua kebutuhan pengujian dari pembangkit tegangan tinggi DC, isolasi minyak, elektroda datar, kotak akrilik, kontaminan, resistor, surge arrester, oscilloscope serta kamera. Kemudian atur jarak antara partikel dengan elektroda ground yang selanjutnya disebut dengan jarak d dapat dilihat pada gambar 3.10. Jarak d ini akan divariasikan tiap 2mm mulai partikel menempel pada elektroda ground hingga partikel menyentuh elektroda tegangan tinggi.

Menurut IEC 156 dan SPLN 49-1:1982, standar pengujian minyak isolasi menggunakan jarak antara elektroda 2,5mm dan nilai tegangan tembusnya 30kV. Namun pada pengujian ini jarak antara elektroda 20mm serta menggunakan elektroda datar, ini bertujuan untuk memudahkan kontaminan memiliki jarak yg berbeda-beda saat berada diantara elektroda.

Setelah objek pengujian di persiapan, maka objek tersebut diberi tegangan tinggi DC secara perlahan dengan kenaikan 2kv tiap 2 detik. Kabel grounding terhubung elektroda datar akan diseri dengan resistor $56,6\Omega$ untuk mendeteksi arus koronanya yang dapat dilihat melalui oscilloscope, kamera digunakan untuk mendapatkan bentuk korona yang diakibatkan adanya partikel melayang serta keluaran dari resistor pengukuran tegangan tinggi terhubung dengan Digital Measuring Instrument 551 untuk melihat *inception voltage* dan *breakdown voltage*. Secara umum, langkah pengujian ini dapat dibuatkan flowchart seperti gambar 3.11.



Gambar 3. 10 Skema elektroda



Gambar 3. 11 Flowchart pelaksanaan pengujian

3.3 Pelaksanaan simulasi

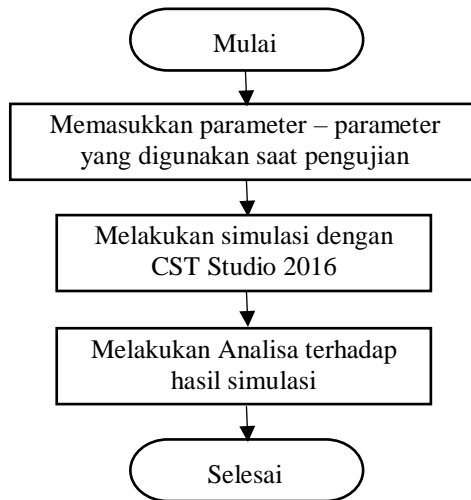
Pada tugas akhir ini akan dilakukan juga simulasi dengan menggunakan aplikasi CST (*Computer Simulation Technology*) Studio Suite 2016, parameter – parameter yang digunakan akan disesuaikan dengan parameter yang ada, seperti: jarak elektroda, jenis elektroda, bentuk elektroda akan dibuat mirip dengan elektroda aslinya. Begitu juga untuk kontaminan dan isolasi akan disesuaikan dengan yang ada pada saat pengujian.

Pada gambar 3.12 merupakan tampilan dari CST Studio 2016, pada tampilan ini kita akan memodelkan objek, elektroda, isolasi serta variabel lain saat pengujian kedalam simulasi ini mulai dari ukuran, posisi hingga jenis bahan yang akan dimodelkan, hasil simulasi ini merupakan penggambaran medan listrik yang terjadi pada elektroda dengan partikel kontaminan. Hasil tersebut dapat di simpan menjadi format PNG ataupun JPG.



Gambar 3. 12 Tampilan simulasi

Pada gambar 3.14 adalah flowchart dari pelaksanaan simulasi ini, simulasi ini bertujuan untuk mendapatkan medan listrik yang terjadi selama pengujian, hasil simulasi ini digunakan sebagai sumber data untuk tugas akhir ini dan hasil dari simulasi CST Studio Suite ini akan diolah pada bab selanjutnya.



Gambar 3. 13 Flowchat pelaksanaan simulasi

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB 4

HASIL DAN ANALISIS

4.1 Breakdown voltage tanpa kontaminan

Hasil pengujian *breakdown voltage* dengan kondisi murni atau tanpa adanya partikel kontaminan. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan elektroda setengah bola dengan jarak antara kedua elektroda sejauh 2,5 mm.

Tabel 4. 1 Breakdown voltage minyak tanpa kontaminan

Percobaan	Tegangan (KV)	Percobaan	Tegangan (KV)
1	41.02	4	40.75
2	40.82	5	39.91
3	40.06	Rata - Rata	40.51

Pada tabel 4.1 merupakan data hasil pengujian *breakdown voltage* pada isolasi minyak tanpa partikel kontaminan, didapatkan nilai rata rata sebesar 40,51 KV untuk isolasi minyak dengan jarak elektroda 2,5mm dalam kondisi murni sebagai nilai acuan untuk pengujian selanjutnya pada penelitian ini.

4.2 Inception dan breakdown voltage

Inception voltage didefinisikan sebagai tegangan dengan pertama kali muncul arus korona sedangkan *breakdown voltage* adalah tegangan saat kekuatan dielektrik dari isolasi minyak sudah tidak mampu menahan tegangan tersebut[11]. Pengujian *inception* dan *breakdown voltage* yang telah dilakukan menghasilkan data sebagai berikut.

Tabel 4. 2 Inception voltage partikel ukuran 5mm

d (mm)	Tegangan (KV)		
	Percobaan 1	Percobaan 2	Percobaan 3
0	60	60.2	60
2	62.2	62.2	62.1
4	61.9	61.9	62
6	61.9	62	61.9
7.5	62.1	62.1	62
9	62	62	62.1
11	62.2	62.1	62.3
13	62	61.9	61.9
15	60.5	60.4	60.4

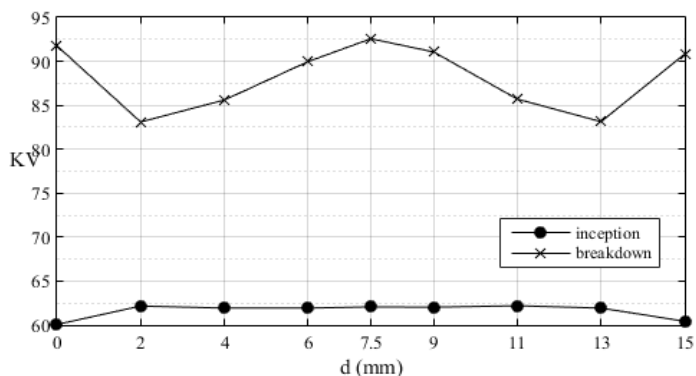
Tabel 4. 3 Breakdown voltage partikel ukuran 5mm

d (mm)	Tegangan (KV)		
	Percobaan 1	Percobaan 2	Percobaan3
0	91.5	92	91.8
2	83.1	83.2	83
4	85.7	85.4	85.7
6	90.1	89.9	89.9
7.5	92.8	92.6	92.3
9	91	91.2	91
11	86	85.6	85.5
13	82.9	83.3	83.2
15	90.7	91.3	90.5

Nilai *inception* dan *breakdown voltage* partikel kontaminan simteris ukuran 5mm pada tabel 4.2 dan 4.3 kemudian dihitung nilai rata – ratanya maka akan mendapatkan hasil seperti pada tabel 4.4. untuk lebih mudah untuk diamati, hasil rata – rata pada tabel 4.4 disajikan kedalam grafik pada gambar 4.1.

Tabel 4. 4 Nilai rata - rata inception dan breakdown voltage partikel 5mm

d (mm)	Rata – rata <i>inception voltage</i>	Rata – rata <i>breakdown voltage</i>
0	60.06666667	91.76666667
2	62.16666667	83.1
4	61.93333333	85.6
6	61.93333333	89.96666667
7.5	62.06666667	92.56666667
9	62.03333333	91.06666667
11	62.2	85.7
13	61.93333333	83.13333333
15	60.43333333	90.83333333



Gambar 4. 1 Grafik inception dan breakdown voltage partikel ukuran 5mm

Pada gambar 4.1 dapat dilihat bahwa tegangan *inception* isolasi minyak dengan partikel kontaminan simetris ukuran 5mm bernilai antara 60 – 62 KV. Nilai terendah terjadi saat partikel menyentuh elektroda *ground* dan elektroda tegangan tinggi dengan nilai masing – masing 60,06 KV dan 60,43 KV. Sementara nilai tegangan *breakdown* isolasi minyak dengan partikel kontaminan ukuran 5mm bernilai antara 83 – 92 KV. Nilai terendah terjadi saat partikel berada dekat dengan elektroda *ground* dan elektroda tegangan tinggi namun tidak menyentuh dengan nilai masing – masing 83,1 KV dan 83,13KV. Nilai tertinggi terjadi saat partikel berada ditengah – tengah kedua elektroda dengan nilai 92,56 KV.

Tabel 4. 5 Inception voltage partikel ukuran 8mm

d (mm)	Tegangan (KV)		
	Percobaan 1	Percobaan 2	Percobaan 3
0	49.7	50	49.9
2	52.5	52.4	52.2
4	52	52	51.8
6	51.9	52	52
8	52.3	52	52
10	52.1	52	51.7
12	51.3	51	51.1

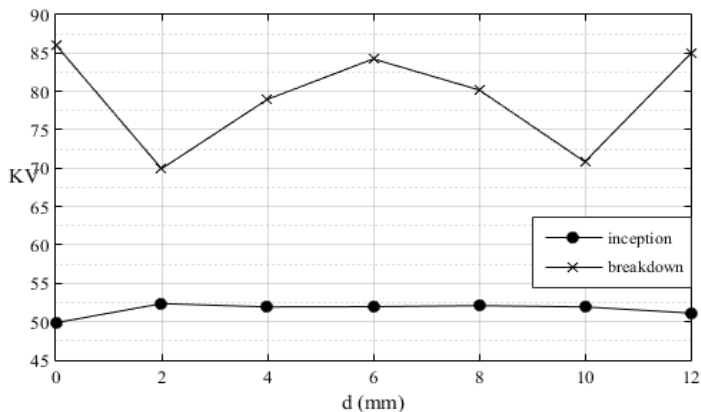
Tabel 4. 6 Breakdown voltage partikel ukuran 8mm

d (mm)	Tegangan (KV)		
	Percobaan 1	Percobaan 2	Percobaan 3
0	86	86	86.2
2	70.1	69.8	69.9
4	79	79	78.9
6	84.3	84.2	84.2
8	80.3	80.5	79.8
10	70.7	71	70.8
12	84.9	84.9	85

Pada tabel 4.5 dan 4.6 merupakan nilai *inception* dan *breakdown voltage* isolasi minyak pada partikel kontaminan simetris ukuran 8mm selanjutnya dihitung nilai rata – ratanya maka akan mendapatkan hasil seperti pada tabel 4.7. untuk lebih mudah untuk diamati, hasil rata – rata pada tabel 4.7 disajikan kedalam grafik pada gambar 4.2.

Tabel 4. 7 Nilai rata - rata inception dan breakdown voltage partikel 8mm

d (mm)	Rata – rata <i>inception voltage</i>	Rata – rata <i>breakdown voltage</i>
0	49.86666667	86.06666667
2	52.36666667	69.93333333
4	51.93333333	78.96666667
6	51.96666667	84.23333333
8	52.1	80.2
10	51.93333333	70.83333333
12	51.13333333	84.93333333



Gambar 4. 2 Grafik inception dan breakdown voltage partikel ukuran 8mm

Pada gambar 4.2 menunjukkan bahwa tegangan *inception* isolasi minyak dengan partikel kontaminan simetris ukuran 8mm bernilai antara 49,8 – 52,3 KV. Nilai terendah terjadi saat partikel menyentuh elektroda *ground* dan elektroda tegangan tinggi dengan nilai masing – masing 49,86 KV dan 51,13 KV. Sementara nilai tegangan *breakdown* isolasi minyak dengan partikel kontaminan ukuran 8mm bernilai antara 69,9 – 86 KV. Nilai terendah terjadi saat partikel berada dekat dengan elektroda *ground* dan elektroda tegangan tinggi namun tidak menyentuh dengan nilai masing – masing 69,93 KV dan 70,83 KV. Nilai tertinggi terjadi saat partikel menyentuh elektroda *ground* yaitu 86,06 KV.

Tabel 4. 8 Inception voltage partikel ukuran 10mm

d (mm)	Tegangan (KV)		
	Percobaan 1	Percobaan 2	Percobaan 3
0	46.3	46.3	46.4
2	48	47.9	47.7
4	47.9	48.1	47.9
5	48.1	48	48
6	47.7	47.9	47.7
8	48.1	48.1	48
10	46.7	47	46.6

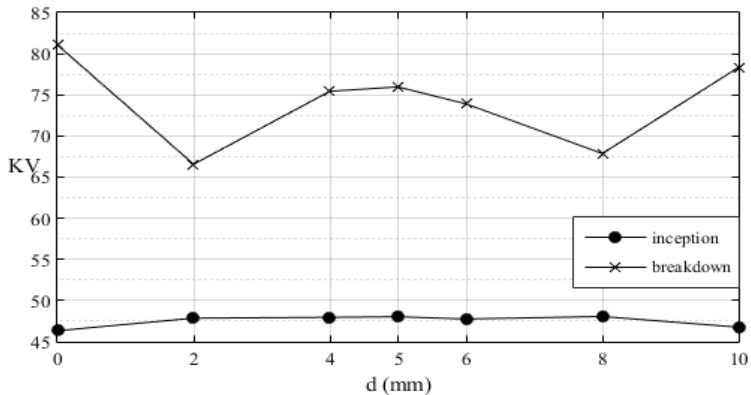
Tabel 4. 9 Breakdown voltage partikel ukuran 10mm

d (mm)	Tegangan (KV)		
	Percobaan 1	Percobaan 2	Percobaan 3
0	81	81.3	80.9
2	66.3	66.4	67
4	76	75	75.3
5	75.7	76	76.2
6	74.2	74.5	73
8	68	68	67.6
10	78	78.5	78.5

Pada tabel 4.8 dan 4.9 merupakan nilai *inception* dan *breakdown voltage* isolasi minyak pada partikel kontaminan unsimetris ukuran 10mm kemudian dihitung nilai rata – ratanya maka akan mendapatkan hasil seperti pada tabel 4.10. untuk lebih mudah untuk diamati, hasil rata – rata pada tabel 4.10 disajikan kedalam grafik pada gambar 4.3.

Tabel 4. 10 Nilai rata - rata inception dan breakdown voltage partikel 10mm.

d (mm)	Rata – rata <i>inception voltage</i>	Rata – rata <i>breakdown voltage</i>
0	46.33333333	81.06666667
2	47.86666667	66.56666667
4	47.96666667	75.43333333
5	48.03333333	75.96666667
6	47.76666667	73.9
8	48.06666667	67.86666667
10	46.76666667	78.33333333



Gambar 4.3 Grafik inception dan brekdown voltage partikel ukuran 10mm

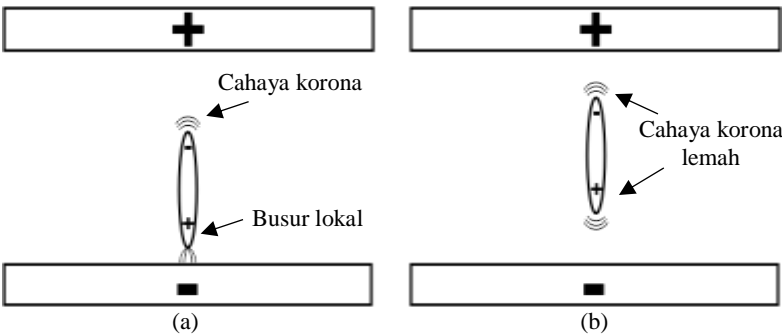
Pada gambar 4.3 menunjukkan bahwa tegangan *inception* isolasi minyak dengan partikel kontaminan unsimetris ukuran 10mm memiliki nilai antara 46,3 – 48 KV. Nilai terendah terjadi saat partikel menyentuh elektroda *ground* dan elektroda tegangan tinggi dengan nilai masing – masing 46,33 KV dan 46,76 KV. Sementara nilai tegangan *breakdown* isolasi minyak dengan partikel kontaminan ukuran 8mm bernilai antara 66,5 – 81,06 KV. Nilai terendah terjadi saat partikel berada dekat dengan elektroda *ground* dan elektroda tegangan tinggi namun tidak menyentuh dengan nilai masing – masing 66,56 KV dan 67,86 KV. Nilai tertinggi terjadi saat partikel menyentuh elektroda *ground* yaitu 81,06 KV.

Dari pengujian *inception* dan *breakdown voltage* ketiga partikel dapat disimpulkan bahwa pengaruh partikel melayang terhadap tegangan *inception* cenderung stabil pada satu nilai tegangan tetapi sedikit lebih rendah ketika menyentuh elektroda. Sedangkan pengaruh partikel melayang terhadap tegangan *breakdown* memiliki tegangan *breakdown* paling rendah ketika partikel berada dekat dengan elektroda tetapi tidak menyentuh.

Pada saat partikel melayang berada dekat dengan salah satu elektroda seperti pada gambar 4.4 (a), partikel akan memiliki jarak terdetat dengan salah satu elektroda dan busur lokal (*local arc*) akan menjembatani celah pendek antara elektroda dengan partikel (*minor gap*), busur lokal ini akan menyebabkan fluktuasi medan pada celah diantara partikel dengan elektroda terjauh (*major gap*). Fluktuasi medan tersebut

dapat mengganggu kestabilan korona yang ada pada *major gap*. Akibat dari kestabilan korona yang terganggu akan terjadi perkembangan pelepasan korona secara aktif pada *major gap* yang berpengaruh terhadap menurunnya tegangan *breakdown*.

Pada saat partikel melayang berada pada pusat celah kedua elektroda seperti pada gambar 4.4 (b), tegangan *breakdown*nya akan lebih baik disebabkan efek dari kestabilan korona pada kedua celah antara partikel dan elektroda, tidak terjadinya busur lokal menyebabkan tidak terjadi fluktuasi medan disalah satu celah antara elektroda dan partikel melayang.



Gambar 4. 4 Mekanisme pelepasan korona pada partikel melayang, (a) partikel dekat dengan elektroda negatif, (b) partikel berada pada pusat celah.

Pada tabel 4.11 adalah nilai perbandingan tegangan *inception* dan *breakdown* dari partikel 5mm, 8mm dan 10mm untuk memudahkan mencari hubungan antara ukuran dan bentuk partikel kontaminan dengan nilai tegangan *inception* dan *breakdown*.

Tabel 4. 11 Nilai rata - rata inception dan breakdown voltage tiap partikel.

Ukuran partikel (mm)	Rata – rata <i>inception voltage</i> (KV)	Rata – rata <i>breakdown voltage</i> (KV)
5	61.64074074	88.52592593
8	51.61428571	79.30952381
10	47.54285714	74.16190476

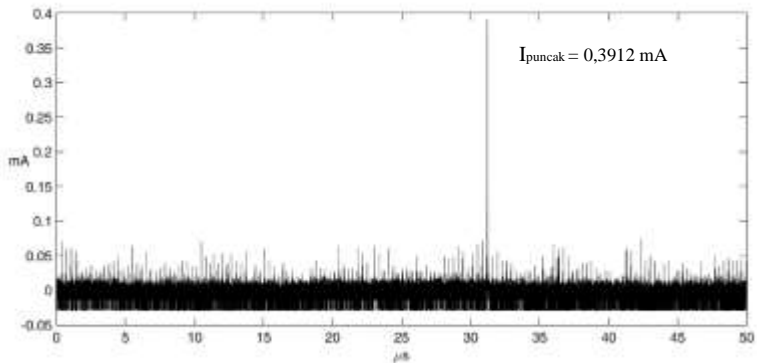
Dari tabel 4.11 dapat disimpulkan bahwa ukuran partikel berbanding terbalik dengan nilai tegangan *inception* dan *breakdown* atau

dengan kata lain semakin besar ukuran dari partikel kontaminan pada isolasi minyak, semakin rendah tegangan *inception* dan *breakdown*nya. Sementara, bentuk partikel kontaminan tidak berpengaruh dengan tegangan *inception* maupun *breakdown*.

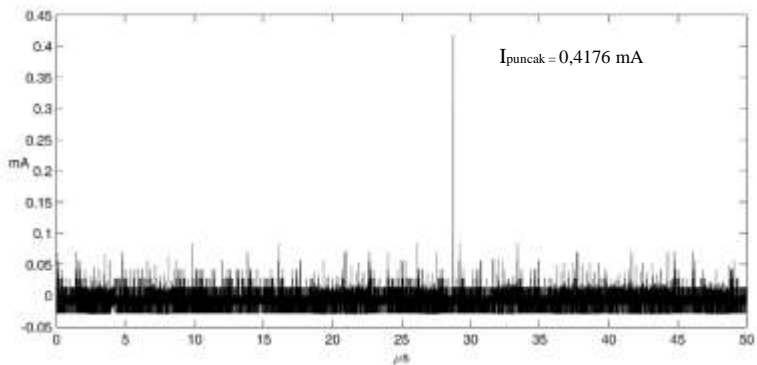
4.3 Arus korona

Setelah didapatkan hasil pada pengujian *inception* dan *breakdown voltage*, selanjutnya pengujian dilakukan untuk mendapatkan arus korona saat *inception* dan didapatkan data sebagai berikut.

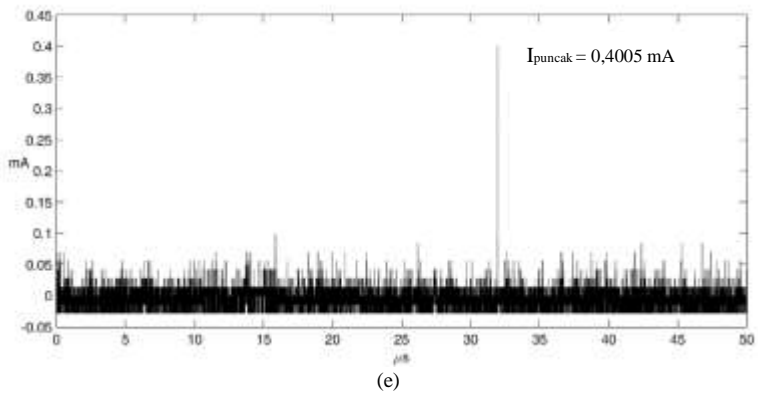
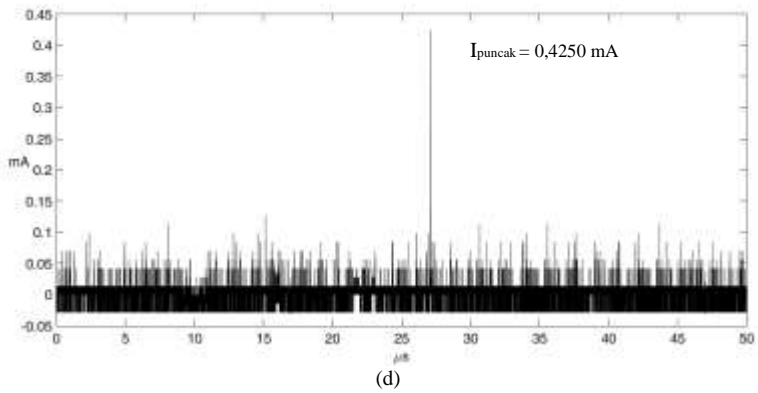
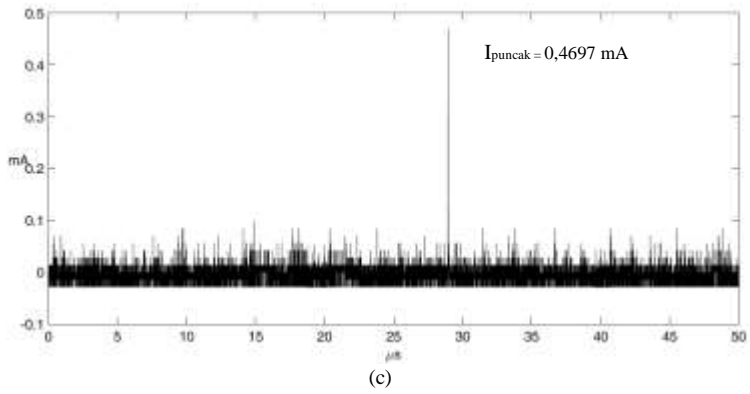
4.3.1 Partikel kontaminan 5mm

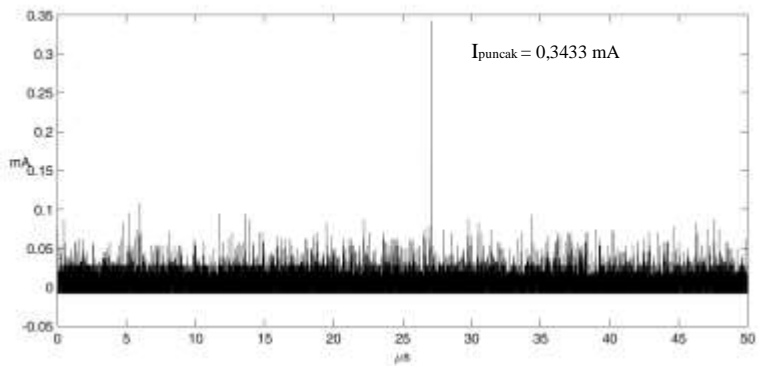


(a)

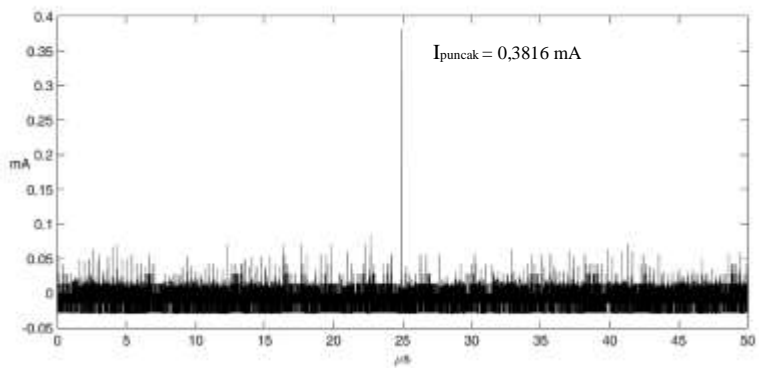


(b)

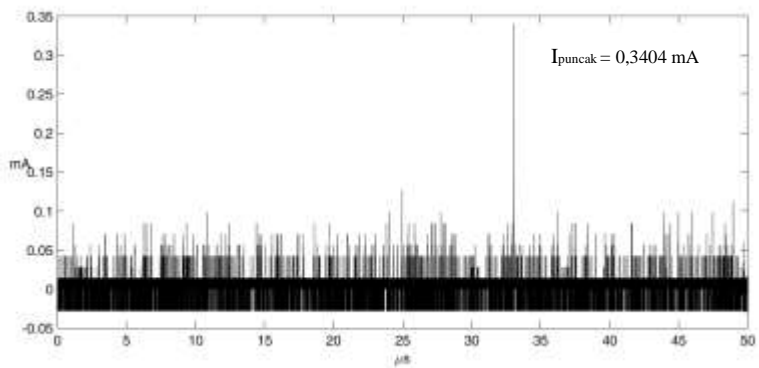




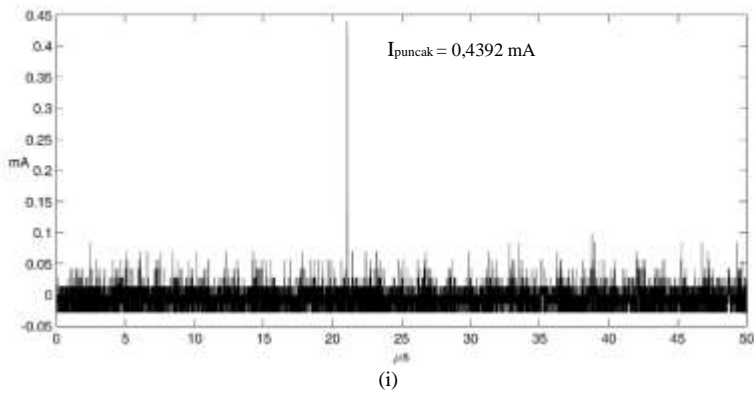
(f)



(g)



(h)



Gambar 4. 5 Arus korona saat inception pada partikel 5mm dengan jarak (a) 0mm, (b) 2mm, (c) 4mm, (d)6mm, (e) 7.5mm, (f) 9mm, (g) 11mm (h) 13mm (i) 15mm.

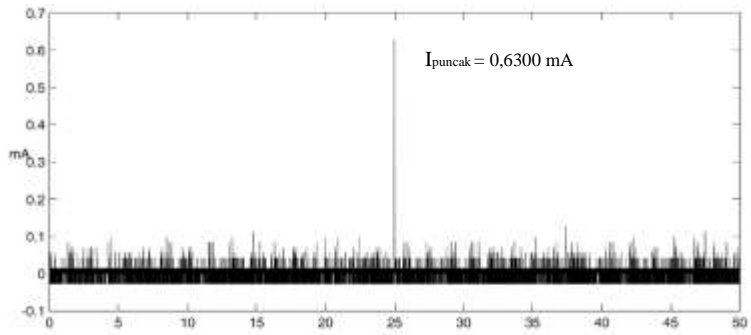
Hasil data arus korona saat *inception voltage* partikel simetris 5mm pada gambar 4.5 dapat dicari nilai puncak untuk masing – masing jarak d, untuk memudahkan dalam membandingkan maka nilai puncak arus akan dimasukkan ke dalam tabel 4.12. Nilai puncak arus korona digunakan untuk mengetahui hubungan antara ukuran partikeldan arus korona saat *inception voltage*.

Tabel 4. 12 Nilai puncak arus korona saat inception partikel 5mm

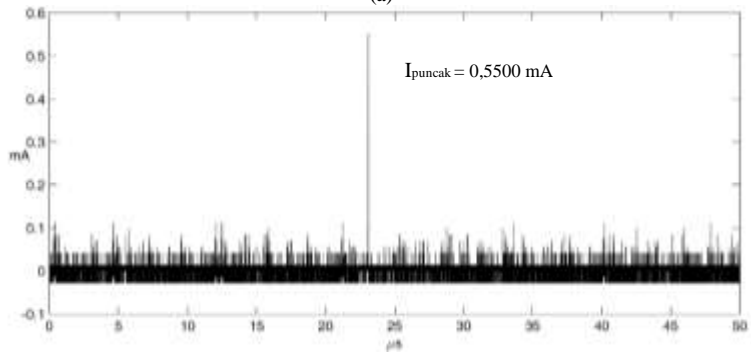
Partikel 5mm			
d (mm)	Nilai puncak (mA)	d (mm)	Nilai puncak (mA)
0	0.3912	9	0.3433
2	0.4176	11	0.3816
4	0.4697	13	0.3404
6	0.4250	15	0.4392
7.5	0.4005	Rata-rata	0.4009

Pada tabel 4.12 nilai puncak arus korona partakel simetris 5mm berada diantara 0.39 – 0.46 mA, nilai puncak terendah 0.39 mA pada jarak 0mm dari elektroda ground dan nilai tertinggi 0.469 mA pada jarak 4mm dari elektroda ground. Nilai rata – rata puncak arus korona partikel 5mm adalah 0.4 mA.

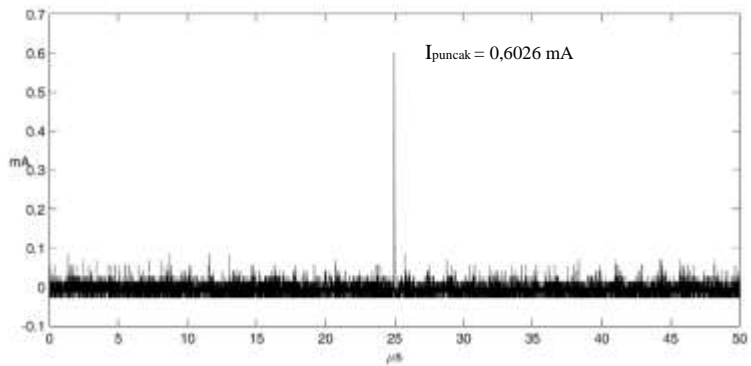
4.3.2 Partikel kontaminan 8mm



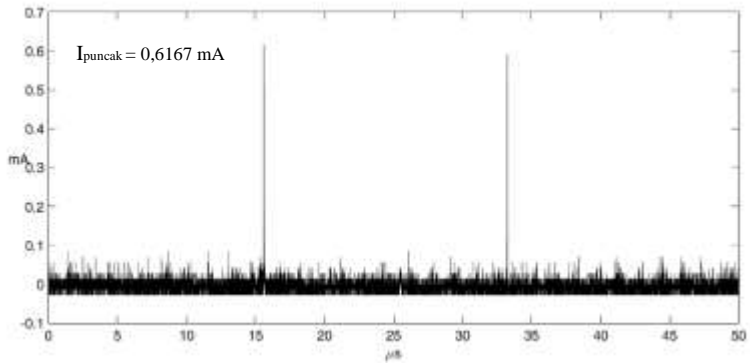
(a)



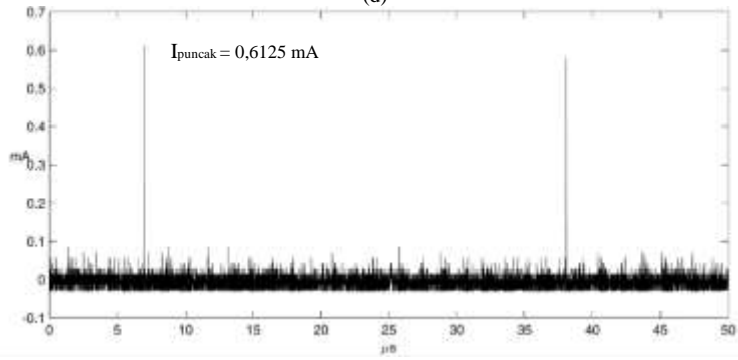
(b)



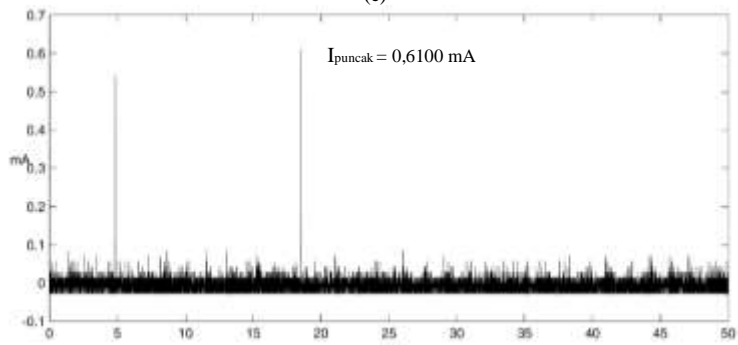
(c)



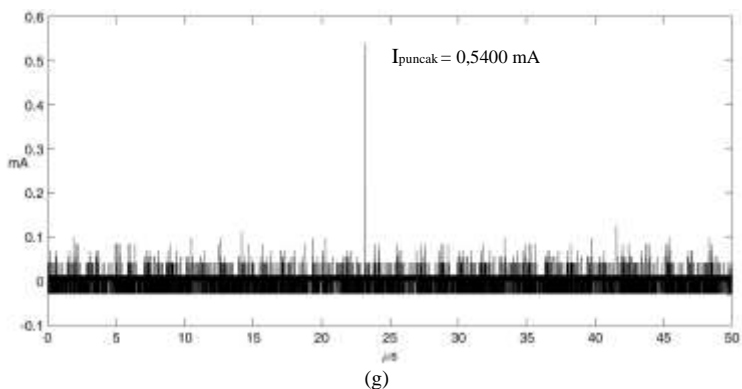
(d)



(e)



(f)



Gambar 4. 6 Arus korona saat inception pada partikel 8mm dengan jarak
(a) 0mm, (b) 2mm, (c) 4mm, (d) 6mm, (e) 8mm, (f) 10mm,
(g) 12mm.

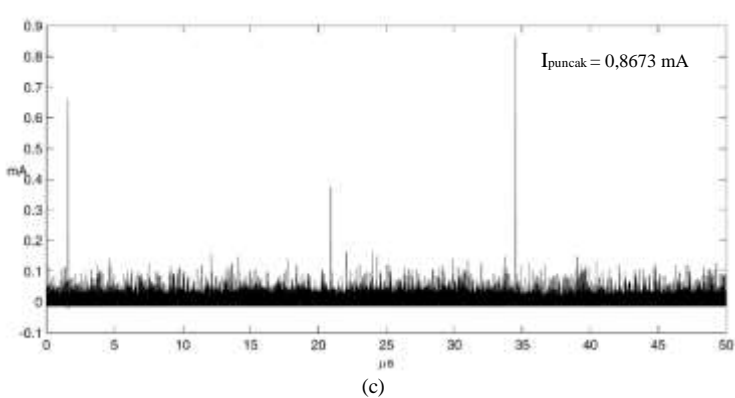
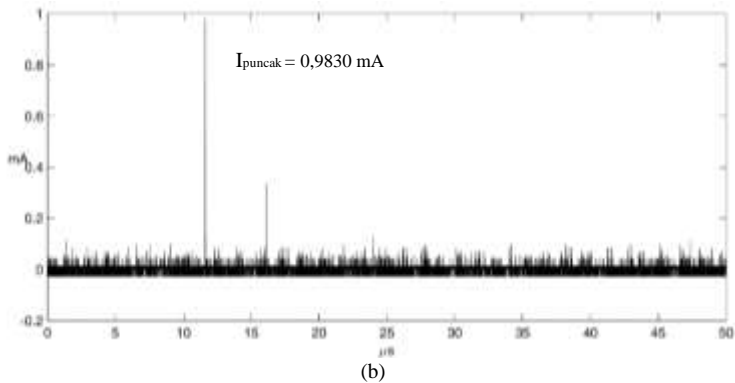
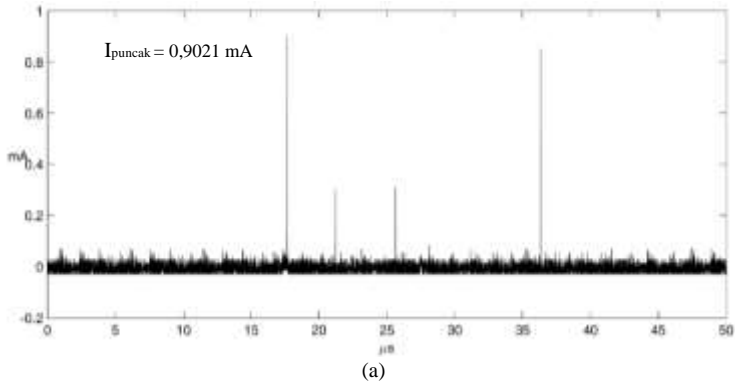
Hasil data arus korona saat *inception voltage* partikel simetris 8mm pada gambar 4.6 dapat dicari nilai puncak untuk masing – masing jarak d , untuk memudahkan dalam membandingkan maka nilai puncak arus akan dimasukkan ke dalam tabel 4.13. Nilai puncak arus korona digunakan untuk mengetahui hubungan antara ukuran partikeldan arus korona saat *inception voltage*.

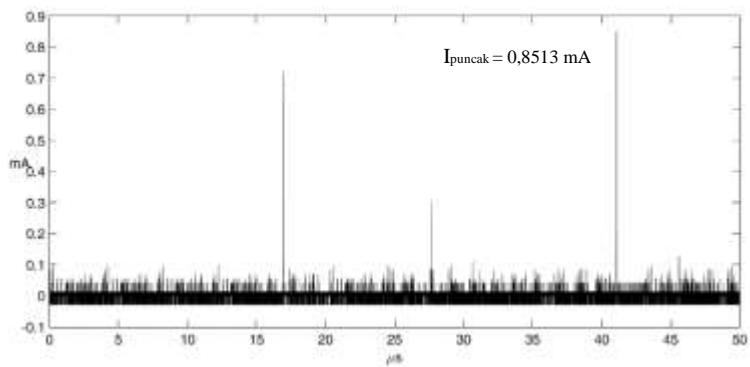
Tabel 4. 13 Nilai puncak arus korona saat inception partikel 8mm

Partikel 8mm			
d (mm)	Nilai puncak (mA)	d (mm)	Nilai puncak (mA)
0	0.6300	8	0.6125
2	0.5500	10	0.6100
4	0.6026	12	0.5400
6	0.6167	Rata-rata	0.5945

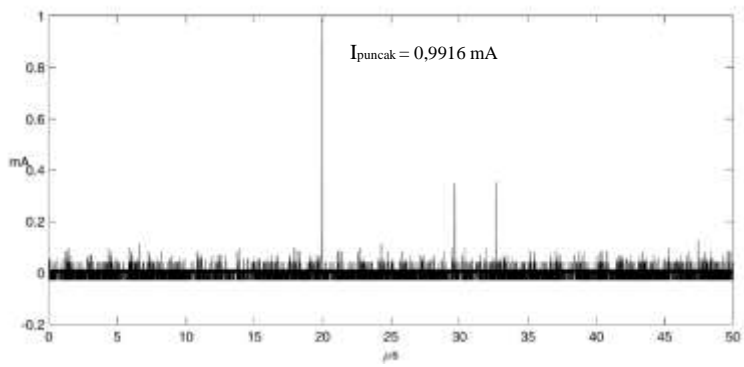
Pada tabel 4.13 nilai puncak arus korona partikel simetris 8mm yang memiliki nilai 0.54 – 0.63 mA, nilai puncak arus terendah saat partikel berada 12mm dari elektroda ground dan nilai puncak arus korona tertinggi saat partikel berada 0 mm. Nilai rata – rata puncak arus korona partikel 8mm adalah 0.5945 mA.

4.3.3 Partikel kontaminan 10mm

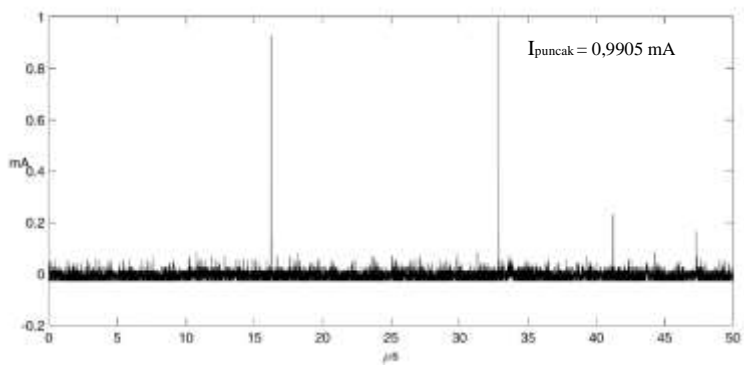




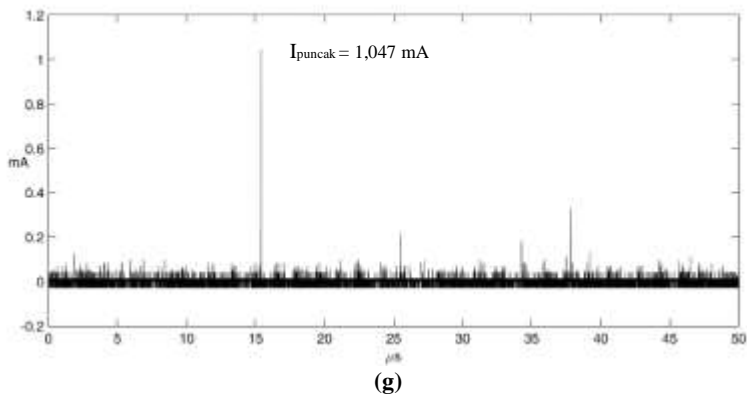
(d)



(e)



(f)



Gambar 4. 7 Arus korona saat inception pada partikel 10mm dengan jarak (a) 0mm, (b) 2mm, (c) 4mm, (d) 5mm, (e) 6mm, (f) 8mm, (g) 10mm.

Hasil data arus korona saat *inception voltage* partikel unsimetris 10mm pada gambar 4.7 dapat dicari nilai puncak untuk masing – masing jarak d, untuk memudahkan dalam membandingkan maka nilai puncak arus akan dimasukkan ke dalam tabel 4.14. Nilai puncak arus korona digunakan untuk mengetahui hubungan antara ukuran partikel dan arus korona saat *inception voltage*.

Tabel 4. 14 Nilai puncak arus korona inception partikel 10mm

Partikel 10mm			
d (mm)	Nilai puncak (mA)	d (mm)	Nilai puncak (mA)
0	0.9021	6	0.9916
2	0.9830	8	0.9905
4	0.8673	10	1.0470
5	0.8513	Rata-rata	0.9475

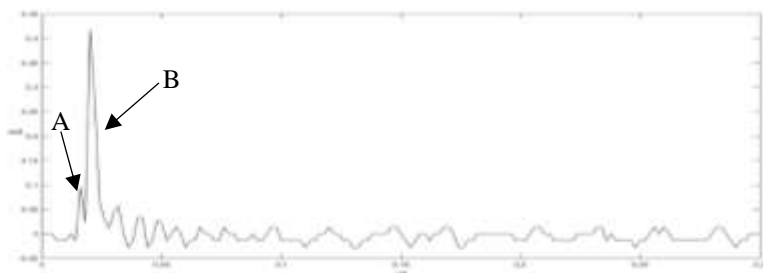
Pada Tabel 4.14 merupakan nilai puncak arus korona partikel 10mm yang bernilai 0.8513 – 1.0470 mA, nilai puncak arus korona terendah saat partikel berada 5mm dari elektroda ground dan memiliki nilai puncak arus korona tertinggi saat partikel berada 10mm dari elektroda ground. Nilai rata – rata puncak arus korona partikel 10 mm adalah 0.9475 mA.

Pada tabel 4.15 adalah nilai perbandingan puncak arus korona dari partikel 5mm, 8mm dan 10mm untuk memudahkan mencari hubungan antara ukuran dan bentuk partikel kontaminan dengan nilai puncak arus korona saat *inception*.

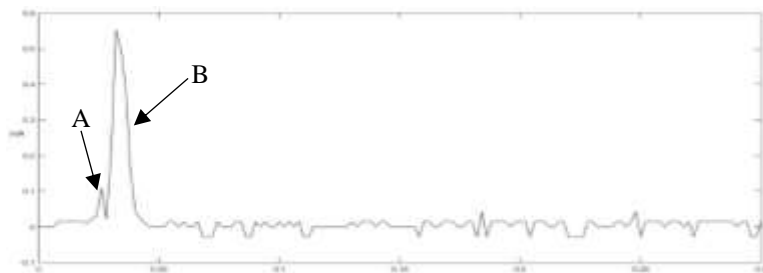
Tabel 4. 15 Nilai rata - rata puncak arus korona saat inception tiap partikel

Partikel (mm)	Rata – rata nilai puncak arus inception (mA)
5	0.4009
8	0.5945
10	0.9475

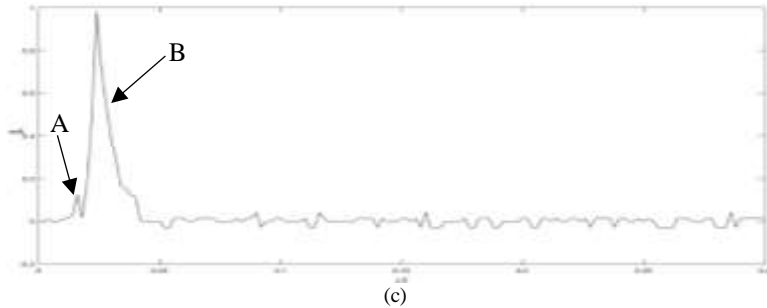
Dari Tabel 4.15 menunjukkan bahwa ukuran partikel kontaminan berbanding lurus dengan nilai puncak arus korona saat *inception voltage*, semakin besar ukuran partikel kontaminan pada isolasi minyak maka semakin besar juga nilai puncak arus koronanya.



(a)

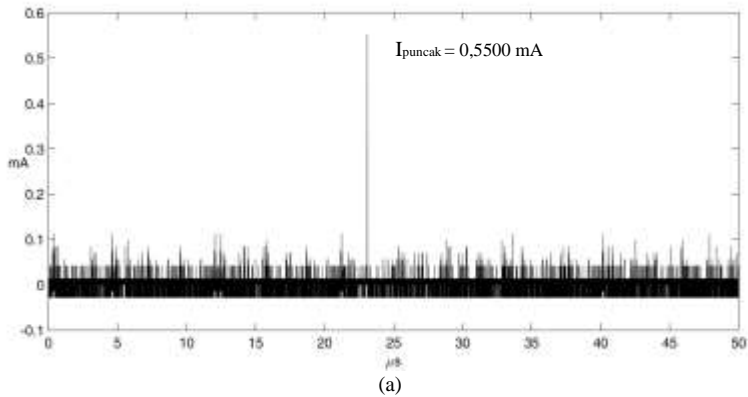


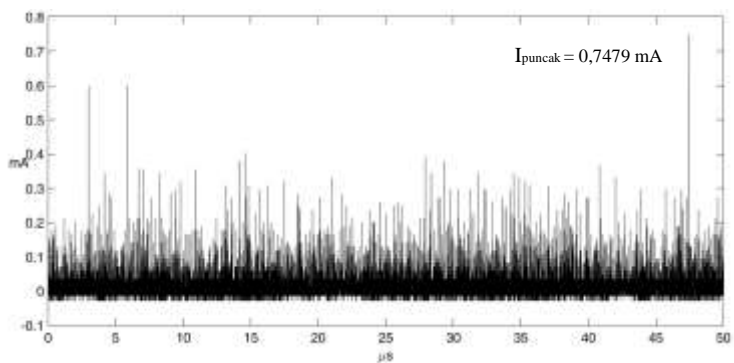
(b)



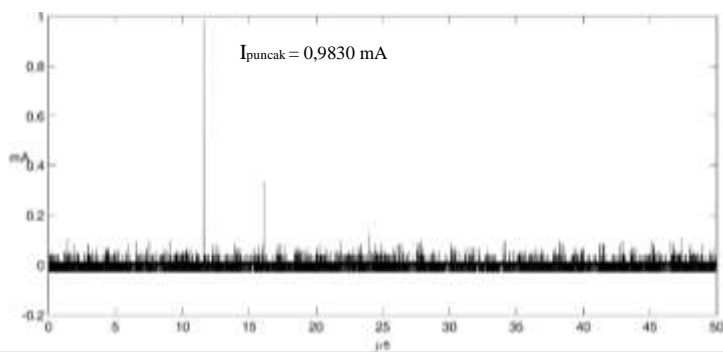
Gambar 4. 8 Arus inception (a) partikel 5mm, (b) partikel 8mm, (c) partikel 10mm dengan $d = 2\text{mm}$ saat diperbesar.

Pada gambar 4.8 merupakan grafik arus partikel 5mm, 8mm dan 10 mm dengan jarak 2mm dari elektroda ground saat diperbesar, terlihat bahwa terdapat 2 bagian yaitu bagian A dan bagian B. Bagian A adalah puncak arus yang kecil sebelum puncak arus korona yang besar (bagian B). Bagian A dapat dikatakan sebagai arus mula – mula yang *men-trigger* arus korona dan bagian B adalah arus korona saat *inception voltage*.

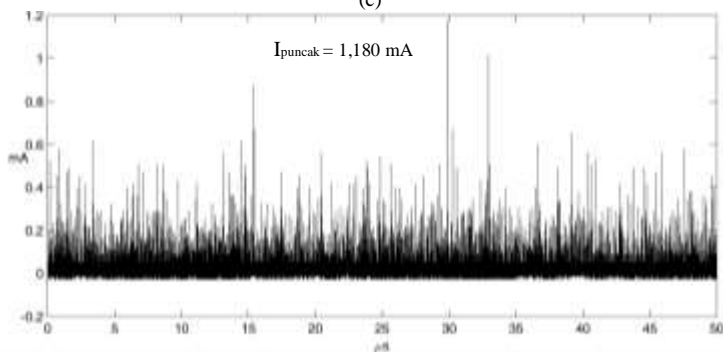




(b)



(c)



(d)

Gambar 4. 9 Perkembangan arus korona (a) partikel 8mm d=2mm 52.36kV, (b) partikel 8mm d=2mm 60kV, (c) partikel 10mm d=2mm 47.86kV, (d) partikel 10mm d=2mm 55kV

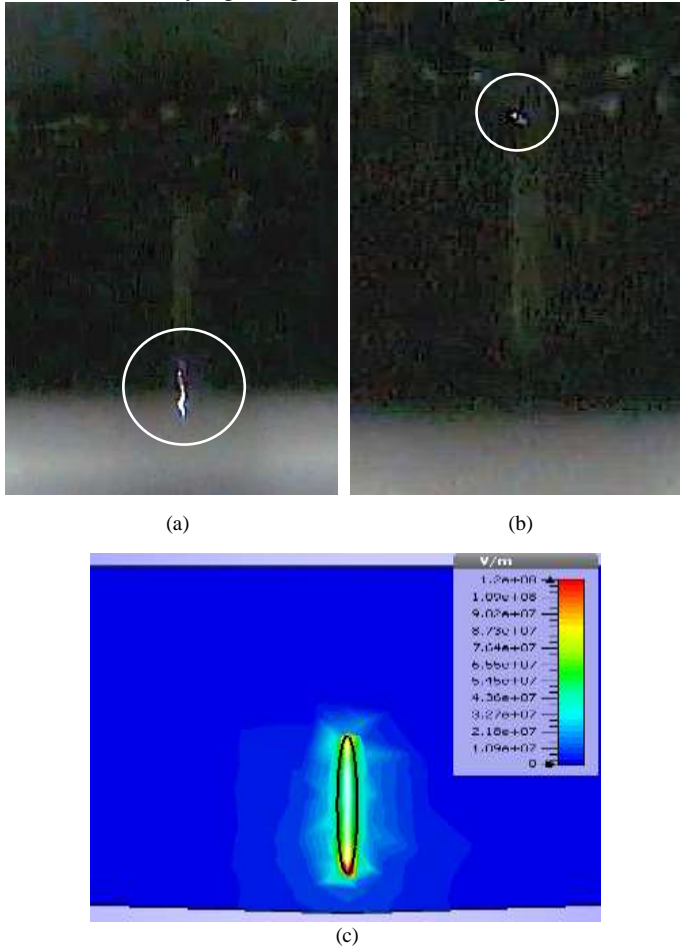
Pada gambar 4.9 merupakan perkembangan arus korona, pada gambar 4.9 (a) dan (b) adalah gambar perkembangan arus korona partikel simetris 8mm dengan jarak 2mm dari elektroda ground terlihat bahwa adanya kenaikan nilai puncak arus korona menjadi 0,7479 mA pada 60 KV yang sebelumnya pada tegangan 52,36KV hanya sebesar 0,55 mA dan diikuti munculnya arus korona lain yang lebih kecil, sulit untuk mengklasifikasikan arus korona ini karena tidak adanya pengulangan bentuk arus korona.

Pada gambar 4.9 (c) dan (d) adalah perkembangan arus korona partikel unsimetris 10mm dengan jarak 2mm dari elektroda ground menunjukkan bahwa adanya kenaikan nilai puncak arus korona menjadi 1,18mA pada tegangan 55 KV yang sebelumnya pada tegangan 47,86 KV hanya bernilai 0,983mA. Kenaikkan arus korona diikuti munculnya arus korona yang lebih kecil, sulit untuk mengklasifikasikan arus korona tersebut dikarenakan tidak adanya pengulangan bentuk arus korona.

Dari gambar 4.9 dapat disimpulkan bahwa Kenaikan tegangan dari pembangkit dapat menaikkan nilai arus korona dan perkembangan arus korona sulit untuk diklasifikasikan sehingga tidak bisa untuk mengetahui pengaruh bentuk partikel terhadap perkembangan arus korona.

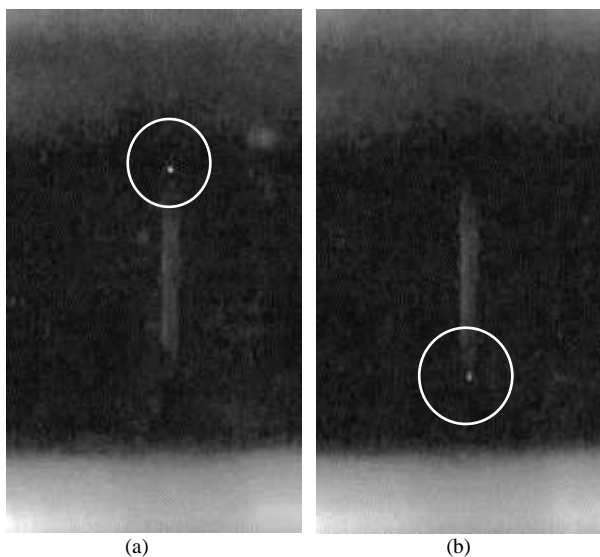
4.4 Fenomena korona dan simulasi

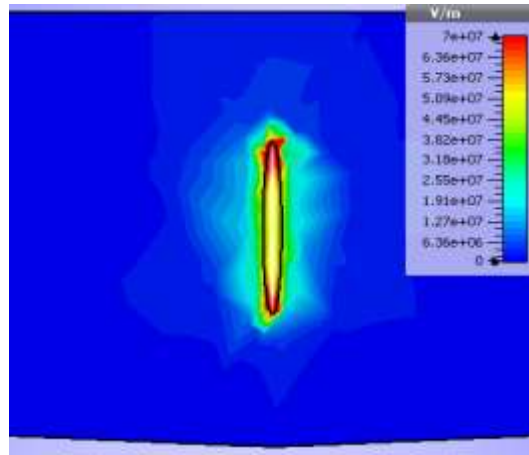
Fenomena korona yang terjadi sebelum *breakdown* dan hasil simulasi CST Studio yang menghasilkan data sebagai berikut.



Gambar 4. 10 Korona pada partikel 8mm (simetris) jarak 2mm 64.2kv, (a) korona pada bagian bawah partikel, (b) korona pada bagian atas partikel, (c) hasil simulasi

Pada partikel simetris (8mm) saat berjarak 2mm dari elektroda ground memiliki dua korona, korona positif dan korona negatif. Pada gambar 4.10 (a) dapat dilihat Korona positif terjadi diantara partikel dengan elektroda ground sedangkan pada gambar 4.10 (b) terlihat korona negatif terjadi diantara partikel dengan elektroda tegangan tinggi. Pada kondisi ini korona negatif lebih besar/kuat dibanding korona positif akibat medan listrik yang lebih besar berada pada bagian bawah partikel karena jaraknya yg lebih dekat dengan elektroda ground. Analisis ini didukung dengan hasil simulasi CST Studio pada gambar 4.10 (c) yang menerangkan bahwa pada kondisi tersebut medan listrik diantara partikel dan elektroda ground lebih besar dibanding medan listrik diantara partikel dan elektroda tegangan tinggi.

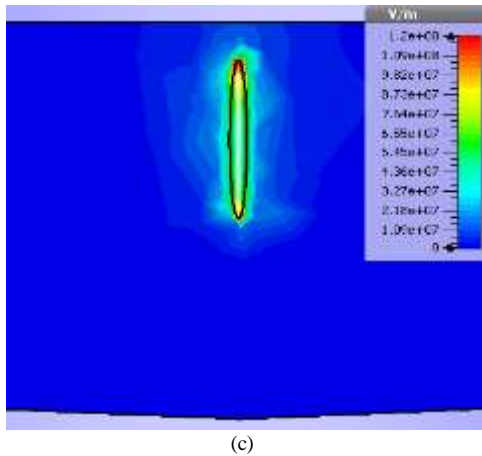
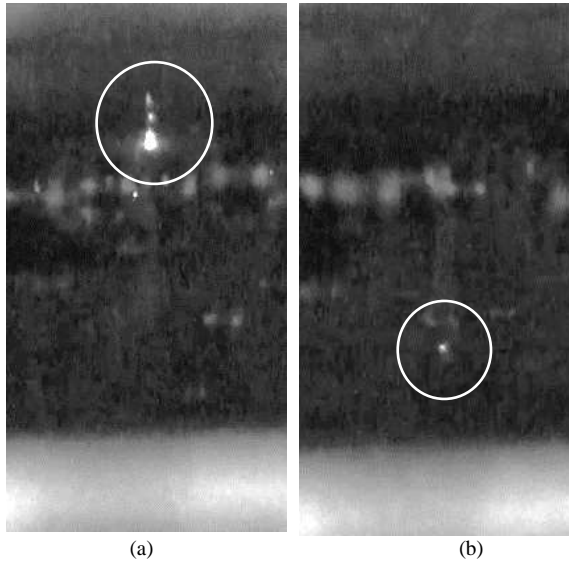




(c)

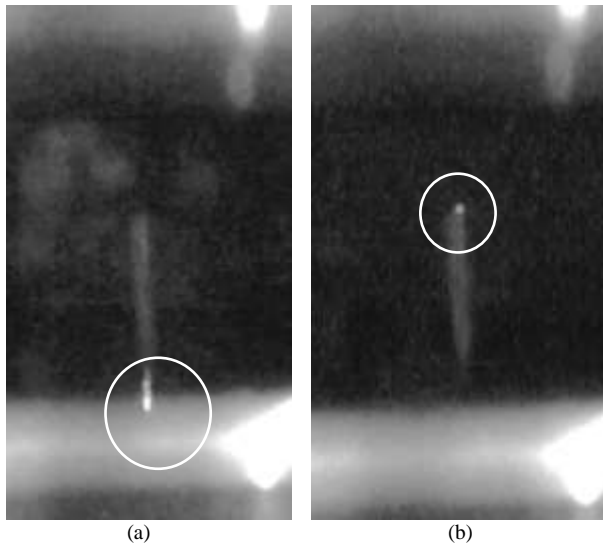
Gambar 4. 11 Korona pada partikel 8mm (simetris) jarak 6mm 75.6kv, (a) korona pada bagian atas partikel, (b) korona pada bagian bawah partikel, (c) hasil simulasi

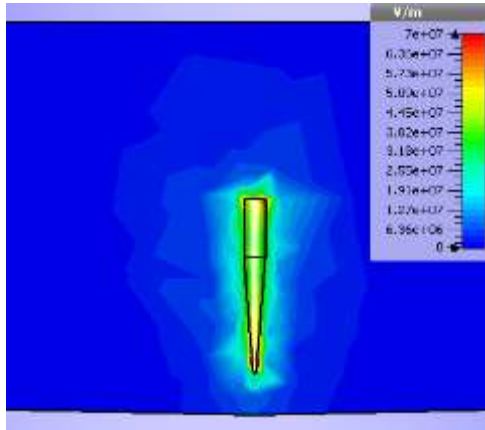
Pada partikel simetris (8mm) saat berada 6mm dari elektroda ground, pada posisi ini partikel berada ditengah – tengah elektroda. Terdapat dua korona yang muncul diantara partikel dan elektroda, yaitu korona negatif dan korona positif. Pada gambar 4.11 (a) terlihat adanya korona negatif diujung partikel yang dekat dengan elektroda tegangan tinggi. Pada gambar 4.11 (b) terlihat korona positif diujung partikel yang dekat dengan elektroda ground. Kedua korona ini sangat lemah, dikarenakan medan listrik dikedua ujung partikel sama besar dan lemah, ini menyebabkan korona yang muncul lemah. Hal ini didukung dengan hasil simulasi CST Studio pada gambar 4.11 (c) yang menunjukkan medan listrik yang terjadi pada kedua ujung partikel sama besar.



Gambar 4. 12 Korona pada partikel 8mm (simetris) jarak 10mm 65kv, (a) korona pada bagian atas partikel, (b) korona pada bagian bawah partikel, (c) hasil simulasi

Pada partikel simetris (8mm) saat berada pada 10mm dari elektroda ground seperti pada gambar 4.12 menunjukkan bahwa terdapat dua korona yang muncul, yaitu korona negatif dan korona positif. Pada gambar 4.12 (a) memperlihatkan korona negatif yang muncul diantara partikel dan elektroda tegangan tinggi, sementara pada gambar 4.12 (b) memperlihatkan korona positif yang muncul diujung partikel yang dekat dengan elektroda ground. Dari kedua gambar tersebut menjelaskan bahwa korona negatif pada kondisi ini lebih kuat dibanding korona positif akibat pada kondisi ini medan listrik yang terjadi diantara partikel dengan elektroda tegangan tinggi lebih besar dibanding medan listrik diantara partikel dan elektroda ground. Hal ini diperkuat dengan hasil simulasi pada gambar 4.12 (c) yang menggambarkan medan listrik diantara partikel dengan elektroda tegangan tinggi pada kondisi ini lebih besar dibanding medan listrik diantara partikel dan elektroda ground.

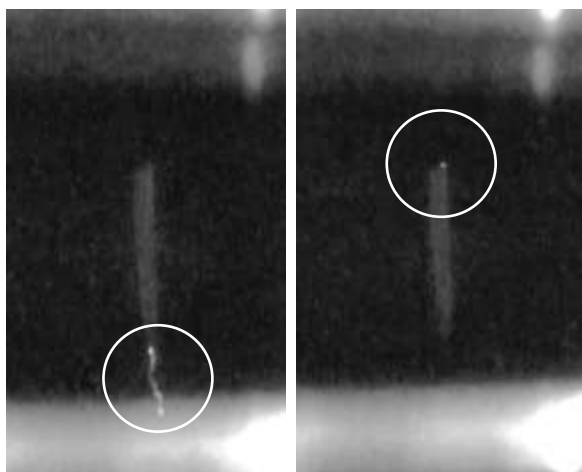




(c)

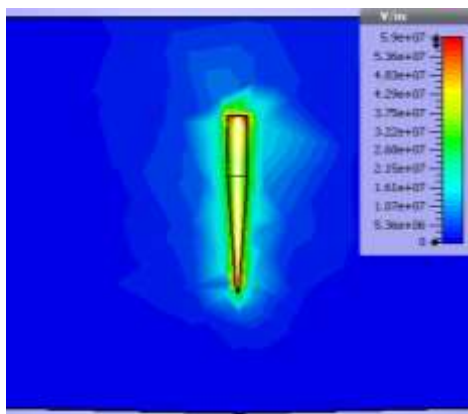
Gambar 4.13 Korona pada partikel 10mm (unsimetris) jarak 2mm 59,4kv, (a) korona pada bagian atas partikel, (b) korona pada bagian bawah partikel, (c) hasil simulasi

Pada partikel unsimetris (10mm) saat berjarak 2 mm dari elektroda ground seperti yang terlihat pada gambar 4.13 terlihat bahwa terdapat dua korona yang terjadi yaitu korona positif dan korona negatif. Pada gambar 4.13 (a) memperlihatkan adanya korona positif yang terjadi diantara partikel dan elektroda ground, sedangkan pada gambar 4.13 (b) terlihat korona negatif pada partikel yang dekat dengan elektroda tegangan tinggi. Pada kondisi ini korona positif lebih kuat daripada korona negatif ini disebabkan medan listrik diantara partikel dan elektroda ground lebih besar dibanding medan listrik diantara partikel dan elektroda tegangan tinggi. Hal ini juga dibuktikan dengan hasil simulasi pada CST Studio pada gambar 4.13 (c) yang memperlihatkan medan listrik ujung partikel yang dekat dengan elektroda ground lebih besar dibanding medan listrik pada ujung partikel yang dekat dengan elektroda tegangan tinggi.



(a)

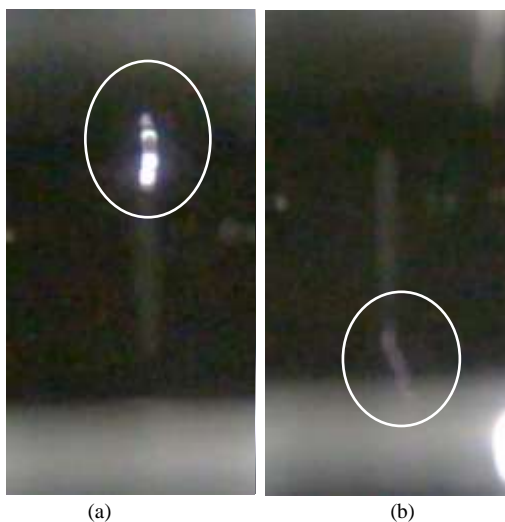
(b)

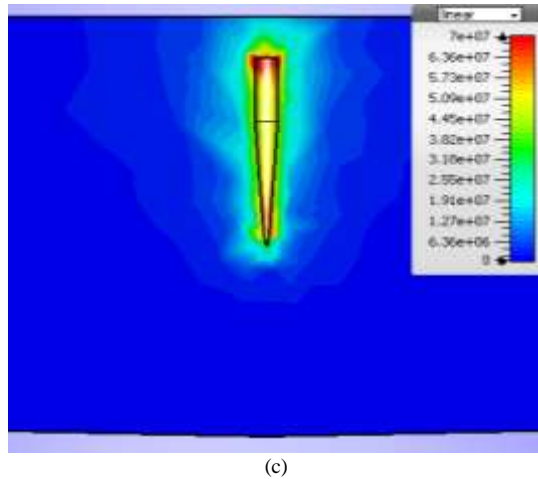


(c)

Gambar 4. 14 Korona pada partikel 10mm (unsimetris) jarak 5mm 71kv,
(a) korona pada bagian atas partikel, (b) korona pada bagian bawah partikel, (c) hasil simulasi

Pada partikel unsimetris (10mm) yang berada 5mm dari elektroda ground, berada pada tengah – tengah antara elektroda, terdapat korona negatif dan korona positif seperti pada gambar 4.14. Pada gambar 4.14 (a) memperlihatkan korona positif yang terjadi diantara elektroda ground dan partikel dan pada gambar 4.14 (b) memperlihatkan korona negatif yang berada diujung partikel yang dekat dengan elektroda tegangan tinggi, pada kondisi ini korona positif lebih kuat dibanding korona negatif akibat bagian partikel yang tidak simetris, bagian yang datar memiliki medan listrik yang seragam dibanding bagian lancip, bagian partikel dekat dengan elektroda ground, yang medan listriknya terkumpul di ujung partikel. Hal ini diperkuat dengan hasil simulasi CST studio yang memperlihatkan hasil seperti pada gambar 4.14 (c) medan listrik pada ujung partikel yang dekat dengan elektroda ground lebih besar dibanding bagian yang dekat dengan elektroda tegangan tinggi.





Gambar 4. 15 Korona pada partikel 10mm (unsimetris) jarak 8mm 60.3kv (a) korona pada bagian atas partikel, (b) korona pada bagian bawah partikel, (c) hasil simulasi

Pada partikel unsimetris (10mm) yang berada 8mm dari elektroda ground seperti pada gambar 4.15, terlihat bahwa terdapat korona negatif dan korona positif. Korona negatif terjadi diantara partikel dan elektroda tegangan tinggi, sedangkan korona positif terjadi diantara partikel dengan elektroda ground. Pada kondisi ini korona negatif lebih kuat daripada korona positif hal ini juga didukung oleh hasil simulasi CST studio pada gambar 4.15 (c), hasil simulasi menunjukkan medan listrik pada bagian partikel yang dekat dengan elektroda tegangan tinggi lebih besar daripada bagian partikel yang dekat dengan elektroda ground.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan pembahasan mengenai hasil data pengujian dan simulasi pada bab sebelumnya, berikut beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari pengujian ini untuk mengetahui pengaruh partikel logam melayang terhadap karakteristik *breakdown* pada isolasi minyak, yaitu :

1. Nilai rata – rata tegangan *inception* berbanding terbalik dengan ukuran partikel, semakin besar partikel pada isolasi minyak maka semakin rendah tegangan *inception*. Nilai rata – rata *inception* terendah terjadi pada partikel ukuran 10mm yaitu bernilai 47,54 KV dan nilai rata -rata *inception* tertinggi terjadi pada partikel ukuran 5mm yaitu bernilai 61,64KV.
2. Tegangan *inception* cenderung stabil pada satu nilai tetapi sedikit lebih rendah saat partikel menyentuh elektroda.
3. Nilai rata - rata tegangan *breakdown* berbanding terbalik dengan ukuran partikel, semakin besar partikel maka semakin rendah tegangan *breakdown* pada isolasi minyak. Nilai rata – rata *breakdown* terendah terjadi pada partikel ukuran 10mm yaitu bernilai 74,16 KV dan nilai rata -rata *breakdown* tertinggi terjadi pada partikel ukuran 5mm yaitu bernilai 88,52KV.
4. Tegangan *breakdown* memiliki nilai terendah saat partikel berada dekat dengan elektroda tetapi tidak menyentuh.
5. Nilai puncak arus korona berbanding lurus dengan ukuran partikel, semakin besar partikel maka semakin tinggi nilai puncak arus korona.
6. Arus korona berbanding lurus dengan tegangan pembangkitan, semakin tinggi tegangan pada pembangkitan maka arus korona akan semakin tinggi.
7. Terdapat dua jenis korona pada partikel melayang, korona negatif dan korona positif.

5.2 Saran

Saran yang dapat dipertimbangkan untuk tugas akhir selanjutnya, yaitu :

1. Pada tugas akhir ini menggunakan minyak mineral shell diala b, untuk tugas akhir selanjutnya dapat menggunakan minyak jenis lain.
2. Pada tugas akhir ini menggunakan resistor yang diseri dengan kabel ground untuk mendeteksi arus korona, untuk tugas akhir selanjutnya dapat menggunakan alat yang dapat mendeteksi arus korona seperti CT (*current transformer*) yang mampu mendeteksi hingga orde milliampere.
3. Pada tugas akhir ini menggunakan oscilloscope untuk menangkap arus korona, untuk tugas akhir selannjutnya dapat menggunakan alat akuisisi data yang lebih Panjang dalam menyimpan arus korona supaya lebih terlihat perkembangan arus korona.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. M. Y. Negara, *Teknik Tegangan Tinggi dan Aplikasi Praktis*. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2013.
- [2] A. D. P. D, “Analisis Pengaruh Temperatur Pada Karakteristik Pre-Breakdown Voltage Dengan Pengujian Isolasi Minyak Trafo,” Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2018.
- [3] M. Y. Setyawan, “Pengaruh Bentuk dan Jumlah Partikel Terhadap Karakteristik Partial Discharge dan Tegangan Tembus Isolasi Minyak Pada Medan Seragam,” Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2014.
- [4] M. S. Naidu dan V. Kamaraju, *High Voltage Engineering 2nd*. New York: McGraw-Hill, 1995.
- [5] R. Jauhari, “Analisis Karakteristik Fisik dan Elektrik untuk Estimasi Umur Minyak Transformator Menggunakan Hukum Arrhenius,” Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
- [6] “Minyak Isolasi, SPLN 49_1.” 1982.
- [7] D. K. Cahyaningrum, “Analisis Karakteristik Fenomena Pre-Breakdown Voltage Berbasis Pengujian pada Media Isolasi Minyak,” Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
- [8] A. M. Helmenstine, “Table of Resistivity and Conductivity at 20°C.” Thoughtco, 2018.
- [9] E. Kuffel, W. S. Zaengl, dan J. Kuffel, *High Voltage Engineering Fundamentals*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [10] M. Hara, Y. Negara, M. Setoguchi, T. Kurihara, J. Suehiro, dan N. Haashi, “Particle-triggered pre-breakdown phenomena in atmospheric air gap under AC voltage,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 12, no. 5, hlm. 1071–1081, Okt 2005.
- [11] Y. Negara, K. Yaji, K. Imasaka, J. Suehiro, N. Hayashi, dan M. Hara, “Corona Discharge Mechanism and Breakdown Voltage Characteristics from Metallic Floating Particle in SF₆ Gas under dc Voltage,” dalam *2006 IEEE 8th International Conference on Properties & applications of Dielectric Materials*, 2006, hlm. 649–652.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Muhammad Novis Ibrahim lahir di Bekasi, Jawa Barat pada tanggal 15 November 1997. Anak kedua dari 3 bersaudara ini tamat pendidikan dasar di SD Cenderawasih Jaya pada tahun 2009. Kemudian melanjutkan pendidikan ke SMP Negeri 1 Bekasi pada tahun 2009 hingga 2012 dan tamat dari SMA Negeri 1 Bekasi pada tahun 2015. Setelah tamat SMA, penulis diterima sebagai mahasiswa S1 Departemen Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) mengambil bidang studi teknik sistem tenaga. Semasa kuliah di ITS pada tahun kedua penulis mengikuti pelatihan pemandu LKMM kemudian menjadi bagian dalam pemandu NEXT-GEN FTE dan aktif berorganisasi di BEM ITS sebagai staff dari badan koordinasi pemandu. Pada tahun ketiga penulis diamanahi sebagai ketua badan koordinasi pemandu fakultas teknologi elektro sekaligus koordinator asisten laboratorium tegangan tinggi. Penulis dapat dihubungi pada alamat email muhnovis@gmail.com